



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ANANINDEUA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

ADAILTON BORGES DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA ADIÇÃO DO PÓ DE ACIARIA EM FORMULAÇÕES COM ARGILA
DO ACARÁ-PA, VISANDO A PRODUÇÃO DE CERÂMICA VERMELHA**

ANANINDEUA-PA

2026

ADAILTON BORGES DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA ADIÇÃO DO PÓ DE ACIARIA EM FORMULAÇÕES COM ARGILA
DO ACARÁ-PA, VISANDO A PRODUÇÃO DE CERÂMICA VERMELHA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais, do *Campus* Universitário de Ananindeua, da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Edemarino Araújo Hildebrando

ANANINDEUA-PA

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)
autor(a)

S586a Silva, Adailton Borges da.
Avaliação da adição do pó de aciaria em formulações
com argila do Acará-PA, visando a produção de cerâmica
vermelha / Adailton Borges da Silva. — 2026.
70 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Edemarino Araújo Hildebrando
Trabalho de Curso (Graduação) - Universidade Federal
do Pará, Campus Universitário de Ananindeua, Curso de
Engenharia de Materiais, Ananindeua, 2026.

1. Cerâmica vermelha. 2. Pó de aciaria. 3. Argila do
Acará-PA. 4. Propriedades cerâmicas. 5. Tensão de
ruptura à flexão. I. Título.

CDD 620.11

ADAILTON BORGES DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA ADIÇÃO DO PÓ DE ACIARIA EM FORMULAÇÕES COM ARGILA
DO ACARÁ-PA, VISANDO A PRODUÇÃO DE CERÂMICA VERMELHA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais, do *Campus* Universitário de Ananindeua, da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Edemarino Araújo Hildebrando

Data de aprovação: 20 de maio de 2026

Conceito: Excelente (E)

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Edemarino Araújo Hildebrando
Orientador – FEMat/CANAN/UFPA

Prof. Me. Alacid do Socorro Siqueira Neves
Membro Interno – FEMat/CANAN/UFPA

Prof. Dr. Diego Hildebrando dos Santos
Membro Externo – FEI/CABAE/UFPA

À minha querida mãe, **Odenira Borges dos Santos**. Esta conquista também é sua!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, quero expressar minha gratidão a Deus, cuja orientação e força foram fundamentais para a realização deste trabalho. A Ele, toda honra e glória.

Agradeço, de coração, aos meus pais, Antônio Borges da Silva e Odenira Borges dos Santos, por todo amor, apoio e sacrifícios que fizeram para que eu pudesse chegar até aqui. Vocês foram e sempre serão meu alicerce.

Aos meus irmãos, Maria José Borges da Silva, Maria de Assunção Borges da Silva e Luiz Antônio Borges da Silva, agradeço pela cumplicidade, incentivo e momentos de alegria que tornaram essa jornada mais leve e especial.

À minha esposa, Maria Domingas Ribeiro Mendonça, minha eterna companheira, agradeço pelo amor incondicional e pela paciência nos momentos de desafio. Sua presença iluminou meu caminho e tornou essa conquista ainda mais significativa.

Não poderia deixar de expressar minha gratidão ao meu orientador, Prof. Dr. Edemarino Araújo Hildebrando. Sua *expertise*, orientação e apoio foram cruciais para o desenvolvimento deste trabalho. Sou imensamente grato pela oportunidade de aprender sob sua supervisão.

Agradeço também aos meus amigos Felipe Pereira, Cássio Araújo, Josias de Souza, Diego José e Giovana Zagalo. Vocês estiveram ao meu lado, compartilhando momentos de dedicação e superação. A amizade e o suporte de cada um de vocês fizeram toda a diferença na minha trajetória.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

Nossa maior fraqueza está em desistir. O caminho mais certo para o sucesso é tentar mais uma vez (Thomas Edison).

RESUMO

A região norte do Brasil se destaca pelo seu potencial de crescimento industrial no que se refere à produção de bens manufaturados. Nesse sentido, a indústria paraense de cerâmica é evidenciada pois, além de promover o crescimento econômico regional, também gera emprego e renda para as comunidades do estado. Adicionalmente, considerando as altas taxas de produção de ferro e aço na referida região, verifica-se que há geração de resíduos oriundos de tais processos de fabricação como o pó de aciaria elétrica (PAE), o qual tem origem na fabricação de aço em fornos elétricos a arco a partir de ferro gusa fundido e sucatas. Desse modo, este trabalho objetiva investigar a incorporação do resíduo siderúrgico pó de aciaria, em formulações com argila caulinítica do município do Acará-PA, visando a sua utilização como insumo na produção de materiais com características adequadas à aplicação tecnológica de cerâmica vermelha. Para tanto, foram investigadas três formulações distintas, com diferentes concentrações de pó de aciaria e argila do Acará. Os corpos de prova constituídos pelos materiais em questão, após o processo de prensagem sob uma carga de 250 kgf/cm^2 , foram submetidos ao processo de queima a 900°C sob diferentes tempos de sinterização — 60 min, 120 min e 180 min — em seguida, as propriedades cerâmicas foram avaliadas. Finalmente, a comparação entre os resultados apresentados pelas amostras com diferentes formulações mostrou que as formulações com 10% e 20% de pó de aciaria têm potencial viabilidade para serem incorporados à cerâmica vermelha, ao atenderem parâmetros de propriedades cerâmicas de perda ao fogo, porosidade aparente, retração linear, massa específica, absorção de água e resistência mecânica, estabelecidos pelas normas ABNT NBR 15270/2023 e ASTM C674-13/2018. Além disso, verifica-se, ainda, que a variação no tempo de sinterização dos corpos de prova foi fundamental para estabelecer as propriedades desejadas, quais sejam: absorção de água, perda ao fogo, massa específica aparente, porosidade aparente, retração linear e resistência à flexão. Finalmente, é possível concluir que os resultados apresentados podem ser considerados promissores para a aplicação em questão.

Palavras-chave: cerâmica vermelha; pó de aciaria; argila do Acará; propriedades cerâmicas; tensão de ruptura à flexão

ABSTRACT

The northern region of Brazil stands out for its potential for industrial growth in terms of the production of manufactured goods. In this sense, the ceramics industry in Pará is highlighted because, in addition to promoting regional economic growth, it also generates employment and income for the state's communities. In addition, considering the high rates of iron and steel production in the region, it can be seen that waste is generated from these manufacturing processes, such as electric arc furnace dust (EAF), which comes from the manufacture of steel in electric arc furnaces from molten pig iron and scrap metal. The aim of this work is to investigate the incorporation of steel mill dust into formulations with kaolinitic clay from the municipality of Acará-PA, with a view to using it as an input in the production of materials with characteristics suitable for technological application in red ceramics. To this end, three different formulations were investigated, with different concentrations of steel mill dust and clay from Acará. The test specimens made up of the materials in question, after being pressed under a load of 250 kgf/cm², were subjected to the firing process at 900°C under different sintering times — 60 min, 120 min and 180 min — after which the ceramic properties were evaluated. Finally, the comparison between the results presented by the samples with different formulations showed that the formulations with 10% and 20% steel mill dust have potential viability for incorporation into red ceramics, as they meet the parameters of ceramic properties of loss on ignition, apparent porosity, linear shrinkage, specific mass, water absorption, and mechanical strength, as established by standards ABNT NBR 15270/2023 and ASTM C674-13/2018. In addition, the variation in the sintering time of the specimens was fundamental in establishing the desired properties, namely: water absorption, loss on firing, apparent specific mass, apparent porosity, linear shrinkage and flexural strength. Finally, it can be concluded that the results presented can be considered promising for the application in question.

Keywords: red ceramics; steel mill dust; Acará clay; ceramic properties; flexural tensile strength

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma representativo do processo de fabricação da cerâmica vermelha, bem como dos produtos fabricados a partir dela	23
Figura 2 - Estrutura cristalina da caulinita através das ligações de hidrogênio	26
Figura 3 - Mapa da região de origem dos materiais utilizados neste trabalho, com destaque para a distância entre os dois pontos de coleta.....	32
Figura 4 - Sequência de obtenção, processamento e análise dos materiais investigados	34
Figura 5 – Almofariz e pistilo utilizados	37
Figura 6 - Prensa hidráulica manual FORTG®, utilizada na conformação dos corpos de prova	38
Figura 7 - CPs pós-conformação.....	38
Figura 8 - Forno mufla utilizado para sinterização e disposição dos corpos de prova	39
Figura 9 - Balança de precisão utilizada para a medição das massas dos corpos de prova	41
Figura 10 - Realização do ensaio mecânico de flexão em um CP	44
Figura 11 - Etapas representativas da sequência de análise dos resultados	45
Figura 12 - DRX da argila do Acará.....	46
Figura 13 - DRX do pó de aciaria	47
Figura 14 - Curvas de aquecimento/desaquecimento dos corpos de prova.....	49
Figura 15 - Perfis de umidade e perda de massa em função do tempo para a Argila do Acará	50
Figura 16 - Perfis de umidade e perda de massa em função do tempo para o pó de aciaria.....	50
Figura 17 - Corpos de prova da formulação A100 sinterizados.....	51
Figura 18 - Corpos de prova da formulação PA9010 sinterizados	52
Figura 19 - Corpos de prova da formulação PA8020 sinterizados	52
Figura 20 - Perda ao fogo em função do tempo de sinterização	53
Figura 21 - Absorção de água em função do tempo de sinterização.....	54
Figura 22 - Porosidade aparente em função do tempo de sinterização	55
Figura 23 - Retração linear em função do tempo de sinterização	57
Figura 24 - Massa específica aparente em função do tempo de sinterização.....	58

Figura 25 - Tensão de ruptura em função do tempo de sinterização.....	59
---	----

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 - Características físicas	29
Tabela 1 - Formulações consideradas neste estudo	36
Tabela 2 - Propriedades das diferentes formulações, de acordo com os respectivos tempos de queima	61
Tabela 3 - Propriedades de diferentes tipos de cerâmicas de acordo com as normas e literatura	61

LISTA DE ABREVIATURAS

A100	Formulação com 100% de argila do Acará-PA
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CP	Corpo de prova
DRX	Difração ou difratometria de raio X
EAP	<i>Electric arc furnace powder</i>
EST	Categoria de blocos de alvenaria estrutural
F1	Formulação 1
F2	Formulação 2
F3	Formulação 3
FAE	Forno de arco elétrico
IG	Instituto de Geociências da UFPA
LCMat	Laboratório de Caracterização de Materiais da UFPA
LCM	Laboratório de Caracterização Mineral da UFPA
PA8020	Formulação com 80% de argila do Acará-PA e 20% de pó de aciaria
PA9010	Formulação com 90% de argila do Acará-PA e 10% de pó de aciaria
PAE	Pó de aciaria elétrica
VED	Categoria de blocos e tijolos de vedação

LISTA DE SÍMBOLOS

PF	Perda ao fogo [%]
AA	Absorção de água [%]
PA	Porosidade aparente [%]
RL	Retração linear [%]
MEA	Massa específica aparente [g/cm ³]
M _S [*]	Massa do corpo de prova seco, anterior à queima [g]
M _S	Massa do corpo de prova seco, após a queima [g]
M _U	Massa do corpo de prova úmido após a queima [g]
M _I	Massa do corpo de prova imerso após a queima [g]
L ₀	Comprimento inicial do corpo de prova [mm]
L ₁	Comprimento do corpo de prova após a queima [mm]

TRF	Tensão de ruptura à flexão [kgf/cm ²]
P	Força aplicada sobre o corpo de prova [kgf]
L	Distância entre os pontos de apoio [cm]
b	Largura do corpo de prova [cm]
h	Espessura do corpo de prova [cm]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Considerações iniciais	15
1.2 Objetivos deste trabalho	16
1.2.1 Objetivo geral	16
1.2.2 Objetivos específicos	16
2 JUSTIFICATIVA	18
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1 Materiais cerâmicos	19
3.2 Produção de materiais cerâmicos	20
3.3 Cerâmica vermelha	21
3.3.1 Tipos de argilas utilizadas na produção de cerâmica vermelha	24
3.3.2 Argila caulínica	25
3.4 Polo cerâmico no estado do Pará	26
3.5 Pó de aciaria elétrica	27
3.5.1 Produção do pó de aciaria elétrica	27
3.5.2 Beneficiamento do pó de aciaria	28
3.7 Impactos ambientais	30
3.8 Utilização do pó de aciaria	30
4 MATERIAIS E MÉTODOS	32
4.1 Matérias-Primas	32
4.2 Fluxograma	32
4.3 Preparação e caracterização das matérias-primas	35
4.3.1 Difração de raios X	35
4.4 Formulações	36
4.5 Conformação	37
4.6 Queima dos corpos de prova	39
4.6.1 Curva de queima	40
4.7 Determinação das propriedades físicas e cerâmicas dos CPs	40
4.7.1 Perda ao fogo	41
4.7.2 Absorção de água	42
4.7.3 Porosidade aparente	42
4.7.4 Retração linear	42
4.7.5 Massa específica aparente	43
4.8 Ensaios mecânicos dos CPs	43

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
5.1 Considerações iniciais	45
5.2 Difração de raios X	45
5.2.1 Argila do Acará	45
5.2.2 Pó de aciaria	47
5.3 Perfis de temperaturas	48
5.4 Propriedades físicas.....	49
5.5 Avaliação visual macroscópica dos CPs	51
5.6 Propriedades cerâmicas	52
5.6.1 Perda ao fogo.....	52
5.6.2 Absorção de água.....	53
5.6.3 Porosidade aparente	55
5.6.4 Retração linear	56
5.6.5 Massa específica aparente	57
5.6.6 Resistência mecânica à flexão	58
5.6.7 Classificação baseada nas propriedades cerâmicas.....	59
6 CONCLUSÕES	61
7 SUGESTÕES PARA A REALIZAÇÃO DE TRABALHOS FUTUROS.....	63
REFERÊNCIAS	64

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

A Engenharia de Materiais é um ramo da ciência e tecnologia aplicadas que busca desenvolver novos produtos, aprimorar os já existentes, além de compreender e explorar propriedades e comportamento dos materiais ao serem submetidos a determinadas aplicações. Dentre as classificações dos tipos de materiais, as cerâmicas se destacam por apresentarem características singulares, além de numerosas possibilidades de aplicações na indústria. Os materiais cerâmicos são compostos por elementos metálicos e não-metálicos, sendo conhecidos por sua elevada dureza, resistência a corrosão e a alta temperatura, além de apresentarem propriedades dielétricas e óticas (Callister, 2020).

Na produção de materiais cerâmicos, faz-se necessária a exploração de diversos modos de manufatura para atender às exigências do mercado. Assim sendo, a fabricação de produtos cerâmicos pode envolver processos de conformação, secagem, queima e acabamento, possibilitando sua utilização em diversas áreas, tais como construção civil, indústria automobilística e indústria eletrônica (Kingery *et al.*, 1976).

Ademais, a região norte do Brasil destaca-se pelo potencial de crescimento industrial no que se refere à produção de produtos cerâmicos. Vale destacar que diversas localidades vêm crescendo e se desenvolvendo como consequência da utilização de recursos naturais em suas regiões, como por exemplo, a argila. Nesse sentido, a indústria paraense de cerâmica é evidenciada pois, além de promover o crescimento econômico regional, também gera emprego e renda para as comunidades do estado do Pará. Além disso, a utilização de materiais locais possibilita a redução dos custos de produção decorrentes do transporte de matéria-prima (Santos, 2009).

Adicionalmente, considerando as altas taxas de produção de ferro e aço na referida região, verifica-se que há a geração de resíduos oriundos de tais processos de fabricação. Dentre esses, o pó de aciaria elétrica (PAE), ou simplesmente pó de aciaria, o qual tem origem na fabricação de aço em fornos elétricos a arco a partir de ferro gusa fundido e sucatas, destaca-se por ser classificado, segundo a norma NBR 10004, como um resíduo sólido perigoso, Classe I (não inerte), devido ao seu potencial

de contaminação ambiental e ameaça à saúde pública. Tal fato tem gerado preocupações tanto para os órgãos de proteção ambiental que estabelecem medidas a serem tomadas pelas indústrias produtoras de aço acerca do impasse em questão, quanto para as próprias indústrias, que enfrentam altos custos de implementação das referidas medidas.

O pó de aciaria é um material de granulometria refinada, resultado de diversas transformações, incluindo a volatilização de metais não ferrosos como Pb, Zn e Cd e a emissão de gotas de aço líquido e escória, que ocorre devido à expansão do monóxido de carbono. Esse processo também envolve a atomização e o arraste de partículas dos materiais que são adicionados aos fornos (Oliveira, 2022). O pó é então capturado pelo sistema de despoeiramento das siderúrgicas, sendo coletado através de dutos de aspiração. (Nikolić *et al.*, 2020). Dessa forma, infere-se ser de fundamental importância investigar possíveis aplicações para o PAE, afim de avaliar a possibilidade de sua reutilização em outras aplicações de interesse prático/comercial e sustentável.

Diante do contexto apresentado, este trabalho objetiva investigar a incorporação do resíduo siderúrgico pó de aciaria, em formulações com argila caulínica do município do Acará, no estado do Pará, visando a sua utilização como insumo na produção de materiais com características adequadas à aplicação tecnológica de cerâmica vermelha.

1.2 Objetivos deste trabalho

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho é a análise da utilização do pó de aciaria na formulação de massas argilosas para a fabricação de cerâmica vermelha.

1.2.2 Objetivos específicos

A fim de se alcançar o objetivo geral apresentado, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar os percentuais de resíduo adicionado às formulações cerâmicas que atendam às propriedades exigidas para os materiais cerâmicos tradicionais;

- Determinar as propriedades físicas e mecânicas dos produtos sinterizados para verificar se estão de acordo com normas técnicas para cerâmica vermelha;
- Realizar ensaios mecânicos nos materiais produzidos, afim de se avaliar a sua qualidade em termos de propriedades;
- Tornar um material de baixo custo e abundante, considerado resíduo, em um produto de maior valor agregado, possibilitando a redução de custos de tratamento e descarte, assim como minimizando os impactos ambientais associados.

2 JUSTIFICATIVA

A utilização de rejeitos industriais na produção de materiais tem despertado interesse crescente devido às preocupações ambientais e à necessidade de redução do consumo de matérias-primas naturais. Nesse contexto, a incorporação de resíduos na fabricação de materiais cerâmicos surge como uma alternativa promissora, pois além de mitigar os impactos ambientais decorrentes do seu descarte, pode agregar valor a um material tido como rejeito (Vaz Neto, 2023).

Diversos estudos realizados mostram que a inserção de rejeitos na produção de materiais cerâmicos pode ser benéfica em termos de aprimoramento de propriedades, conferindo a estes maior resistência mecânica, menor porosidade e maior durabilidade (Wang; Liu, 2012). Além disso, a adição de rejeitos pode contribuir para a redução dos custos de produção, já que esses materiais são muitas vezes obtidos a baixo custo. Contudo, ainda são poucos os trabalhos disponíveis na literatura, que abordam o uso do pó de aciaria associado à matéria-prima para a produção de cerâmica vermelha.

Assim, a realização da presente investigação justifica-se pela necessidade de se explorar e avaliar o potencial de utilização do pó de aciaria na produção de cerâmica vermelha, isto é, determinar a viabilidade técnica da aplicação em questão, bem como contribuir com uma alternativa para a redução dos impactos ambientais associados ao descarte irregular do rejeito em questão.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Materiais cerâmicos

Os materiais cerâmicos são uma classe de materiais não metálicos e inorgânicos, que são geralmente formados através da aplicação de calor seguido de resfriamento. Eles são amplamente utilizados devido às suas propriedades físicas e químicas únicas. Entre suas principais características estão a dureza, resistência ao calor, baixa condutividade elétrica e resistência ao desgaste e à corrosão. Essas propriedades tornam os cerâmicos ideais para uma ampla gama de aplicações industriais e tecnológicas, (Callister, 2020).

Esses materiais possuem uma estrutura cristalina complexa que contribui para suas propriedades distintas. Eles são compostos principalmente por compostos de metal e não metal, como óxidos, carbetos, nitretos e silicatos. A estrutura atômica desses materiais pode ser tanto cristalina quanto amorfa. Cerâmicos cristalinos, como a alumina e a zircônia, apresentam arranjos atômicos bem definidos, enquanto os cerâmicos vítreos, como o vidro, possuem uma estrutura desordenada (Callister, 2020).

Uma das características mais notáveis dos cerâmicos é a sua elevada dureza e resistência à compressão, que são significativamente superiores às dos metais e polímeros. No entanto, eles também são frágeis e possuem baixa tenacidade, o que significa que são propensos a fraturas quando submetidos a tensões de tração. A fragilidade é uma consequência da natureza rígida de suas ligações iônicas e covalentes, que não permitem a movimentação fácil das discordâncias no material, (Pérez; Gutiérrez, 2020).

Para Jesus (2016), os materiais cerâmicos são conhecidos por suas propriedades isolantes em relação ao calor e à eletricidade, apresentando baixas condutividades térmicas e elétricas. Eles demonstram maior resistência a altas temperaturas e ambientes corrosivos quando comparados a metais e polímeros. Além disso, as cerâmicas podem exibir diferentes características ópticas, sendo opções como transparentes, translúcidas ou opacas. Em termos de propriedades magnéticas, algumas cerâmicas à base de óxidos, como a magnetita (Fe_3O_4), apresentam comportamento magnético distinto.

Devido às suas propriedades excepcionais, os materiais cerâmicos são amplamente utilizados em diversas indústrias. Na engenharia mecânica, eles são empregados em ferramentas de corte e revestimentos protetores. Na indústria eletrônica, cerâmicos como a alumina são utilizados em isoladores e substratos de circuitos integrados. Além disso, na biomedicina, cerâmicos como a hidroxiapatita são utilizados para implantes ósseos devido à sua biocompatibilidade. A capacidade dos cerâmicos de resistir a temperaturas extremas também os torna ideais para aplicações em motores a jato e fornos industriais (Wang *et al.*, 2023).

Segundo Jesus (2016), os materiais cerâmicos são caracterizados por sua rigidez e resistência, comparáveis às propriedades mecânicas dos metais. Apesar de sua elevada dureza, esses materiais são extremamente frágeis, apresentando uma ausência de ductilidade que os torna vulneráveis a fraturas.

Embora os cerâmicos apresentem muitas vantagens, sua fragilidade representa um desafio significativo. Pesquisas estão em andamento para desenvolver cerâmicos com maior tenacidade e resistência ao impacto. Técnicas como a adição de reforços de fibras ou partículas, e a criação de compósitos cerâmicos, têm mostrado resultados promissores. Além disso, inovações na manufatura aditiva estão permitindo a criação de cerâmicos com estruturas complexas e propriedades customizadas. Essas melhorias ampliam ainda mais o potencial dos materiais cerâmicos em aplicações avançadas e emergentes (Sousa, 2021).

3.2 Produção de materiais cerâmicos

O primeiro passo na produção de materiais cerâmicos é a seleção das matérias-primas, que podem incluir argilas, sílica, alumina e outros compostos inorgânicos. Esses materiais são cuidadosamente escolhidos com base nas propriedades desejadas do produto final. Após a seleção, as matérias-primas são preparadas através de processos como moagem, mistura e classificação. A moagem fina é particularmente importante para garantir uma distribuição de partículas uniforme, o que é crucial para a qualidade do material cerâmico final, (Duarte, 2023).

Depois de preparadas, as matérias-primas são conformadas em formas específicas usando técnicas como prensagem a seco, extrusão ou moldagem por injeção. A conformação é seguida pela sinterização, um processo de aquecimento controlado que promove a densificação do material sem fundi-lo completamente.

Durante a sinterização, as partículas cerâmicas se fundem e criam ligações fortes, resultando em um material denso e resistente. Este processo é essencial para conferir ao material cerâmico suas propriedades mecânicas e térmicas superiores, (Kingery,1976).

3.3 Cerâmica vermelha

A cerâmica vermelha é um tipo de material cerâmico amplamente utilizado na construção civil devido à sua durabilidade, resistência e custo relativamente baixo. É composta principalmente por argila, que, quando queimada em altas temperaturas, adquire uma coloração vermelha característica devido à presença de óxidos de ferro. Os produtos mais comuns feitos de cerâmica vermelha incluem tijolos, telhas, ladrilhos e tubos de esgoto. Sua produção e utilização remontam a milhares de anos, evidenciando sua importância e versatilidade ao longo da história (Almeida, 2023).

A matéria-prima principal para a cerâmica vermelha é a argila, que é abundante e fácil de extrair. A argila utilizada geralmente contém uma mistura de silicatos de alumínio hidratados, óxidos de ferro, quartzo e outros minerais. O processo de fabricação começa com a extração e preparação da argila, que é então misturada com água para formar uma massa homogênea. Esta massa é moldada em formas desejadas, como tijolos ou telhas, através de processos de extrusão ou prensagem. Após a moldagem, os produtos são secos para remover a umidade residual antes de serem queimados em fornos a temperaturas que podem variar entre 800°C a 900°C, (Farias ,2020).

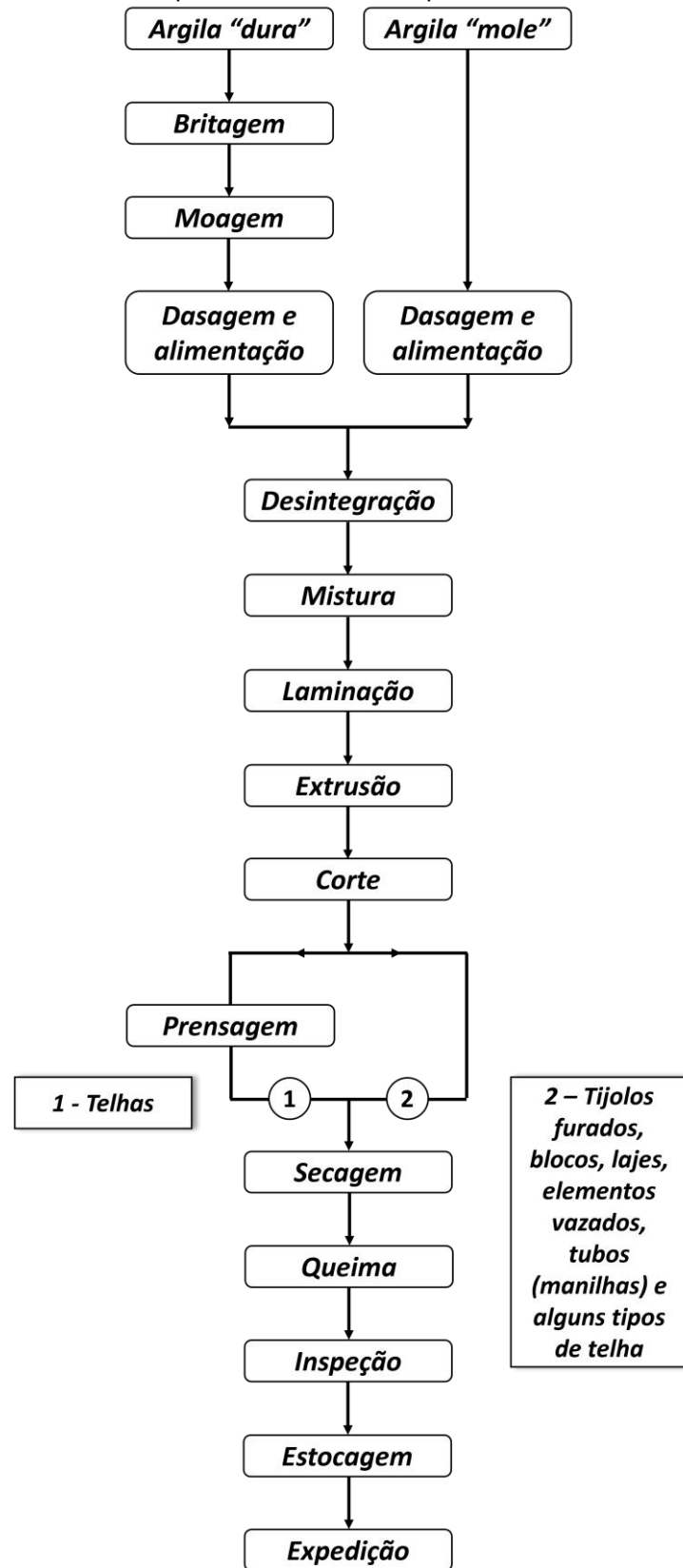
A argila vermelha é amplamente utilizada na indústria cerâmica, especialmente na fabricação de produtos estruturais como tijolos, telhas e blocos cerâmicos. Sua coloração característica se deve à presença de óxidos de ferro, que também influenciam na cor final após a queima. Essa argila apresenta boa plasticidade, o que facilita os processos de conformação por extrusão, além de possuir uma granulometria adequada para garantir boa compactação e resistência mecânica dos produtos. Seu ponto de vitrificação moderado permite o desenvolvimento de fases vítreas que conferem coesão ao material cerâmico.

Entre suas principais propriedades destacam-se a plasticidade intermediária, o bom comportamento na secagem e a capacidade de desenvolver resistência após a queima. No entanto, a composição da argila vermelha pode variar bastante de acordo

com a jazida, o que requer controle na preparação da massa cerâmica. Suas aplicações incluem desde produtos rústicos de construção até cerâmicas decorativas de baixo custo. A abundância e o baixo custo de extração tornam a argila vermelha um dos materiais mais acessíveis e utilizados na cerâmica tradicional (Santos; Santos, 1998; Holanda; Mello, 2000; Monteiro; Andrade; Lima, 2003).

A Figura 1 apresenta um fluxograma representativo do processo de fabricação de alguns produtos cerâmicos feitos a partir de argila. A referida sequência pode apresentar variações no contexto prático em função do tipo de peça, da produção e do estágio tecnológico da empresa (ABCERAM, 2024).

Figura 1 - Fluxograma representativo do processo de fabricação da cerâmica vermelha e dos produtos fabricados a partir dela



Fonte: ABCERAM (2024)

A cerâmica vermelha possui várias propriedades que a tornam ideal para a construção civil. É um material poroso e permeável, o que lhe confere boa resistência mecânica e capacidade de isolamento térmico e acústico. Além disso, a cerâmica vermelha é resistente ao fogo e à intempérie, o que aumenta sua durabilidade em diferentes condições climáticas. Sua cor vermelha, decorrente dos óxidos de ferro presentes na argila, é valorizada esteticamente e pode variar em tons dependendo da composição específica da argila e das condições de queima, (Pereira, 2019).

A cerâmica vermelha é utilizada em uma ampla gama de aplicações na construção civil. Os tijolos de cerâmica vermelha são os mais comuns e são usados na construção de paredes, alvenarias e estruturas de suporte. As telhas de cerâmica vermelha são populares em coberturas devido à sua durabilidade e capacidade de isolamento térmico. Ladrilhos e revestimentos de cerâmica vermelha são utilizados em pisos e paredes, proporcionando uma superfície durável e esteticamente agradável. Além disso, tubos e dutos de cerâmica vermelha são usados em sistemas de esgoto e drenagem devido à sua resistência à corrosão e durabilidade (Médici, 2022).

3.3.1 Tipos de argilas utilizadas na produção de cerâmica vermelha

Na produção de cerâmica vermelha, utilizam-se predominantemente argilas caulínicas, ilíticas e, em menor escala, montmoriloníticas. As caulínicas são comuns devido à sua abundância e facilidade de queima, embora apresentem baixa plasticidade. As argilas ilíticas, ricas em mica e potássio, oferecem maior plasticidade e fundência, favorecendo a sinterização e melhorando a resistência mecânica do produto final. Já as montmoriloníticas, apesar de conferirem alta plasticidade, apresentam elevado encolhimento na secagem e na queima, o que pode gerar defeitos como trincas e empenamentos, sendo por isso utilizadas com cautela ou em misturas.

As vantagens do uso dessas argilas estão relacionadas à ampla disponibilidade natural, ao baixo custo e à capacidade de conformação variada (extrusão, prensagem, etc.). Além disso, quando corretamente misturadas, as diferentes argilas podem equilibrar propriedades plásticas, resistência mecânica e cor final do produto. No entanto, suas desvantagens incluem variações composicionais naturais, que afetam a padronização do processo, e a presença de impurezas, como óxidos de ferro, que

podem interferir na tonalidade e na formação de fases durante a queima. A escolha adequada e o controle das misturas são essenciais para garantir qualidade na produção da cerâmica vermelha (Santos; Santos, 1998; Quintela; Holanda, 2001; Holanda; Angélica, 2005).

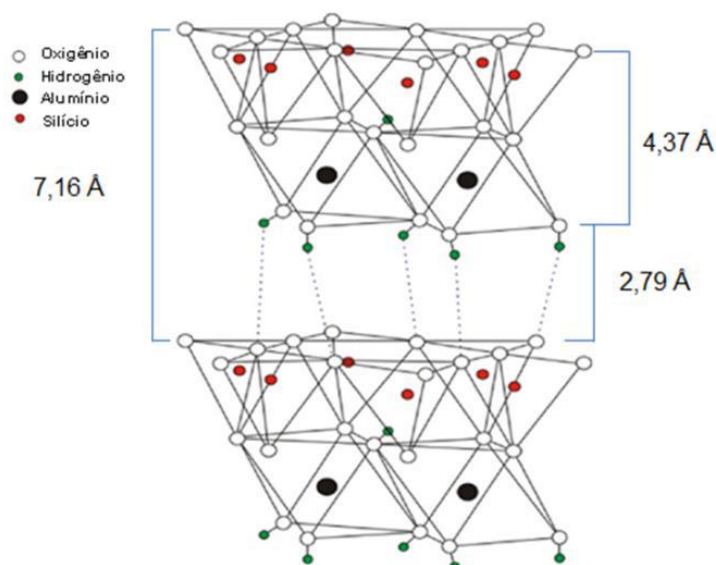
3.3.2 Argila caulinítica

A argila caulinítica, também conhecida como caulinita, é um mineral do grupo das argilas com estrutura lamelar do tipo 1:1, composta por uma caulinita e um mineral. Essa estrutura confere à caulinita baixa plasticidade e reatividade em comparação com outros tipos de argilas, como as montmoriloníticas. Em seu estado puro, a caulinita apresenta cor branca, mas impurezas como óxidos de ferro podem torná-la avermelhada, fato comum em argilas utilizadas na cerâmica vermelha. Sua decomposição térmica ocorre por volta de 500–600 °C, com a formação da metacaulinita, estágio importante para o desenvolvimento de fases cerâmicas mais estáveis em temperaturas mais altas.

No contexto da cerâmica vermelha, a argila caulinítica é amplamente empregada por sua abundância e propriedades que favorecem o processo de conformação e queima. Apesar de sua baixa plasticidade, quando misturada com argilas mais plásticas e materiais fundentes, proporciona boa trabalhabilidade e contribui para a estabilidade dimensional dos produtos cerâmicos. Durante a queima, a presença da caulinita favorece a formação de mulita e vidro amorfo, conferindo resistência mecânica ao produto final. Além disso, a cor avermelhada típica da cerâmica vermelha resulta da presença de óxidos de ferro associados às caulinitas impuras (Santos; Santos, 1998; Quintela; Holanda, 2001; Meyer, 2004; Zanella; Beruto, 2007).

A Figura 2 representa a estrutura cristalina da caulinita, composta por uma camada tetraédrica de sílica e uma camada octaédrica de alumínio. As camadas são unidas por ligações de hidrogênio, formando uma estrutura lamelar típica dos minerais do grupo das argilas.

Figura 2 - Estrutura cristalina da caulinita através das ligações de hidrogênio



Fonte: Cheng et al. (2012)

3.4 Polo cerâmico no estado do Pará

O Estado do Pará contribui significativamente para a indústria cerâmica, com diversas regiões que se destacam na cadeia produtiva. São Miguel do Guamá, Santa Izabel do Pará, Cametá, Abaetetuba, Santarém, Bragança, Marabá e regiões próximas à metrópole de Belém, como Castanhal, Santa Izabel, Benevides e Acará outras localidades desempenham papel decisivo neste setor, fornecendo matéria-prima e estimulando a produção de cerâmica vermelha, amplamente utilizada na construção civil e em diversas aplicações. No entanto, é relevante observar que existe um alto grau de informalidade nos negócios, na produção e no emprego direto nesse setor. (Rodrigues *et al.*, 2021).

De acordo com o relatório “Linha Base – APL Cerâmica Vermelha” do Governo Federal, a produção de cerâmica vermelha no Pará alcançou aproximadamente 92 mil toneladas por mês em 2017, o que representa cerca de 46 milhões de peças mensais. Esse volume corresponde a aproximadamente 1,32% da produção nacional desse tipo de material cerâmico, posicionando o estado como o 15º maior produtor no país. Esses dados destacam a relevância da indústria cerâmica paraense tanto em âmbito regional quanto nacional (Rodrigues *et al.*, 2021).

A cadeia produtiva da cerâmica vermelha no estado do Pará abrange várias etapas, desde a extração da matéria-prima até a fabricação de produtos acabados, como tijolos, telhas e blocos cerâmicos. Esse processo não apenas gera empregos,

mas também impulsiona a economia local, sustentando diretamente cerca de 20 mil pessoas e criando oportunidades indiretas em áreas como transporte, comércio e serviços (Rodrigues, 2017).

A madeira, utilizada principalmente como combustível nos fornos de queima, e a água, necessária para o processamento da argila, são outros recursos naturais abundantes na região que favorecem a produção cerâmica. Esses recursos naturais, aliados à experiência adquirida ao longo dos anos, têm permitido a produção de cerâmica vermelha de alta qualidade e competitividade.

A argila extraída no município de Acará-PA, destaca-se por suas propriedades adequadas à produção de cerâmica vermelha, sendo amplamente utilizada nos polos cerâmicos da região, como o de São Miguel do Guamá. Essa matéria-prima apresenta boa plasticidade, trabalhabilidade e resistência mecânica, além de coloração avermelhada após a queima devido ao elevado teor de óxido de ferro. Estudos indicam que a argila de Acará, mesmo quando utilizada em formulações puras ou combinada com resíduos industriais, como a lama vermelha do processo Bayer, mantém conformidade com normas técnicas para a fabricação de blocos cerâmicos, telhas e outros produtos. Essa versatilidade, aliada à disponibilidade local e à possibilidade de incorporação de resíduos, contribui para a preferência por essa matéria-prima na indústria cerâmica regional, promovendo sustentabilidade e redução de custos (Vaz Neto, 2023).

3.5 Pó de aciaria elétrica

3.5.1 Produção do pó de aciaria elétrica

A produção do pó de aciaria elétrica ocorre principalmente em fornos de arco elétrico (FAE), onde sucata de aço é fundida utilizando eletricidade como fonte de energia. Esse processo envolve a criação de altas temperaturas que transformam a sucata em aço líquido. Durante a fusão, diversas impurezas e componentes indesejáveis são removidos, formando a escória. O pó de aciaria elétrica é um subproduto capturado dos gases emitidos durante este processo, utilizando sistemas de controle de poluição, como filtros de mangas e precipitadores eletrostáticos. Esse pó contém uma mistura complexa de óxidos metálicos, incluindo zinco, ferro, cádmio, e chumbo, que são recuperados e processados para reutilização (Oliveira, 2022).

O pó de aciaria elétrica é caracterizado por uma composição variada que reflete os materiais de entrada no forno e as condições de operação. Essas propriedades tornam o pó de aciaria uma fonte potencialmente valiosa de materiais recicláveis, particularmente o zinco, que pode ser recuperado e reintroduzido na cadeia produtiva. A granulometria fina e a presença de metais pesados, no entanto, exigem um manuseio cuidadoso para evitar a dispersão de partículas e a contaminação ambiental (Oliveira, 2022).

O gerenciamento do pó de aciaria elétrica apresenta desafios significativos devido à sua composição complexa e aos potenciais riscos ambientais. Tecnologias de tratamento, como a lixiviação ácida e processos piro metalúrgicos, são empregadas para extrair metais valiosos e reduzir a toxicidade do resíduo. Recentemente, inovações na reciclagem e no tratamento de resíduos estão sendo desenvolvidas para melhorar a eficiência e a sustentabilidade do processo. A implementação de práticas mais sustentáveis e a otimização dos processos de recuperação de metais não só mitigam os impactos ambientais, mas também adicionam valor econômico à produção de aço em fornos de arco elétrico (Almeida, 2018).

3.5.2 Beneficiamento do pó de aciaria

O beneficiamento e os aspectos da produção do pó de aciaria envolvem uma série de etapas e considerações importantes, Ramos (2010) relatou observações e estudos de diversos autores e apresenta uma breve visão de fases e elementos presentes no PAE, baseando-se na formação em atmosfera oxidante e concluindo que mais de 90% do pó é constituído por óxidos. O Quadro 1 mostra uma abordagem simplificada desses estudos

Após a produção do aço nos fornos de arco elétrico, o pó de aciaria é coletado a partir dos gases emitidos durante o processo de fusão. Este pó é então separado de outros materiais sólidos presentes na corrente de gases, como a escória, através de sistemas de controle de poluição. Métodos de tratamento incluem a lixiviação ácida, onde os metais são dissolvidos em soluções ácidas para separação e purificação, e técnicas piro metalúrgicas, que envolvem a fusão e separação dos metais por meio de seus diferentes pontos de fusão (Oliveira, 2022; Silva, 2006).

Uma vez tratado, o pó de aciaria pode ser reciclado e reintroduzido na cadeia produtiva. Os metais recuperados podem ser utilizados como matéria-prima na produção de novos materiais de aço ou em outras aplicações industriais. Isso contribui para a economia circular, reduzindo a necessidade de extrair novos recursos naturais e minimizando o impacto ambiental (Nikolić et al., 2020; Ramos, 2010).

Quadro 1 - Características físicas

Características	Intervalos normalmente relatados	Desvantagens
Granulometria	Menor que 10 μm , onde a aglomeração ocorre em grande extensão.	Após a lixiviação, apresenta dificuldade na separação sólido líquido.
Densidade aparente	3,50 g/cm ³ - 4,74 g/cm ³	Volume considerável quando se visa o descarte ou armazenamento. Difícil de ser reintroduzido no processo de produção sem aglomeração ou técnicas de injeção
Área Superficial Específica	0,40 m ² /g 5,60 m ² /g medida pelo método BET	Devido à área superficial relativamente alta, há necessidade de grande quantidade de reagente. No caso de hidro metalúrgico. processo
Umidade	0,1% 0,3% de umidade para sistemas de captação a seco. Em sistemas de captação a úmido, o pó pode apresentar até 50% de umidade.	Pós úmidos apresentam aglomeração e pós secos ficam em suspensão sendo difícil sua retirada dos depósitos

Fonte: Ramos (2010)

Assim, o beneficiamento do pó de aciaria requer cuidados especiais devido à presença de metais pesados e outras substâncias tóxicas. É essencial adotar práticas de gestão ambiental responsáveis para garantir que o processo de produção seja seguro e sustentável. Isso inclui a implementação de medidas de controle de poluição, o monitoramento da qualidade do ar e da água, e a adoção de equipamentos de proteção individual para os trabalhadores.

O beneficiamento do pó de aciaria também envolve considerações econômicas e regulatórias. Os custos associados ao tratamento e reciclagem do pó devem ser avaliados em relação aos benefícios econômicos da recuperação dos metais. Além disso, é importante garantir o cumprimento das regulamentações ambientais e de segurança aplicáveis, tanto a nível local quanto nacional, para evitar impactos negativos na comunidade e no meio ambiente (Oliveira, 2022)

O beneficiamento e a produção do pó de aciaria são processos complexos que requerem uma abordagem integrada, considerando aspectos técnicos, ambientais, econômicos e regulatórios. O objetivo final é maximizar a recuperação de materiais valiosos, enquanto se minimiza o impacto ambiental e se garante a segurança dos trabalhadores e da comunidade (Oliveira, 2022).

3.7 Impactos ambientais

A emissão de gases e partículas durante o processo de fusão do aço pode contribuir para a poluição do ar, afetando a qualidade do ar e a saúde das comunidades próximas às instalações industriais (Oliveira, 2022). Para mitigar esses impactos ambientais, são necessárias medidas de controle e gestão adequadas, incluindo o desenvolvimento e implementação de tecnologias de controle de poluição, como filtros de mangas e precipitadores eletrostáticos, para reduzir as emissões atmosféricas. Além disso, é fundamental adotar práticas de gestão de resíduos que visem a recuperação e reutilização dos materiais residuais, minimizando a disposição em aterros e a contaminação ambiental. Investimentos em monitoramento ambiental contínuo e participação ativa das comunidades locais também são essenciais para garantir a sustentabilidade ambiental da indústria do aço (Oliveira, 2022).

3.8 Utilização do pó de aciaria

A utilização do pó de aciaria é uma prática importante na indústria siderúrgica, pois permite o reaproveitamento de materiais residuais e a recuperação de metais valiosos presentes nos rejeitos do processo. Este pó pode ser utilizado em diversas aplicações, incluindo a fabricação de cimento Portland®, onde é utilizado como adição mineral, substituindo parcialmente o clínquer na produção de cimento. Além disso, o pó de aciaria pode ser utilizado na produção de materiais de construção, como tijolos,

blocos e pavimentos intertravados, onde atua como um aglomerante, melhorando as propriedades mecânicas e durabilidade dos produtos (Almeida, 2018).

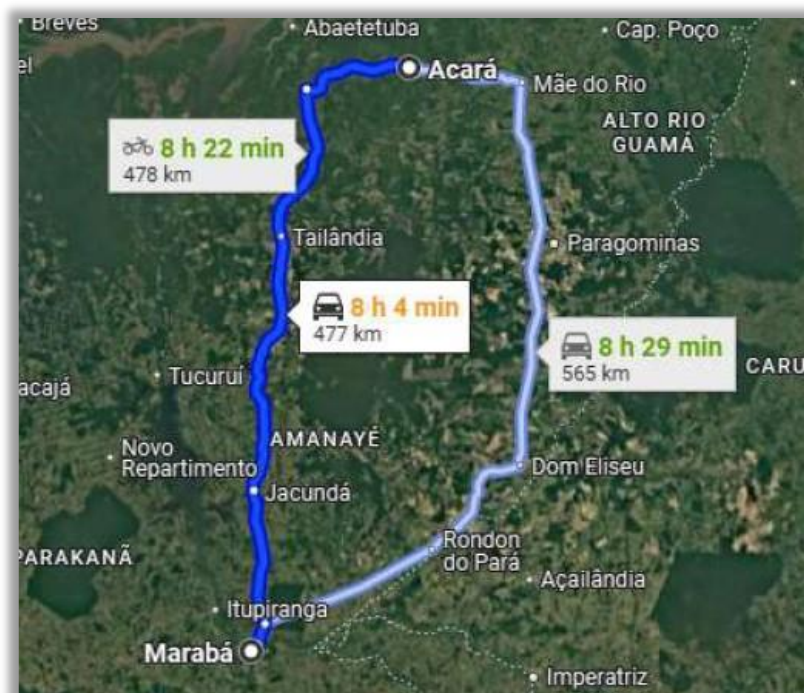
Outra aplicação importante do pó de aciaria é na recuperação de metais valiosos, como zinco, ferro, cádmio e chumbo, presentes nos rejeitos do processo. Através de técnicas de tratamento e reciclagem, é possível extrair esses metais e reintegrá-los na cadeia produtiva, reduzindo a necessidade de extrair novos recursos naturais e minimizando o impacto ambiental associado à mineração. Isso não só contribui para a conservação dos recursos naturais, mas também para a redução dos custos de produção e a melhoria da eficiência energética na indústria siderúrgica. Em resumo, a utilização do pó de aciaria é uma prática sustentável que permite o aproveitamento máximo dos recursos e a redução do impacto ambiental da produção de aço.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Matérias-Primas

Neste estudo, foram utilizadas a argila proveniente do município de Acará-PA e o pó de aciaria, oriundo do processo de produção de aço realizado por uma indústria siderúrgica localizada em Marabá-PA. A Figura 3 destaca a distância entre os dois pontos de coleta das referidas matérias-primas, de aproximadamente 478 km, sendo este um ponto de partida para a avaliação dos parâmetros logísticos para o estudo de viabilidade de operação e obtenção do material em ampla escala de produção (Vaz Neto, 2023).

Figura 3 - Mapa da região de origem das matérias-primas utilizadas neste trabalho, com destaque para a distância entre os dois pontos de coleta



Fonte: Google Maps (2025)

4.2 Fluxograma

Este estudo foi desenvolvido de acordo com a metodologia proposta por Hildebrando *et al.* (2014) a qual foi adaptada para atender aos objetivos específicos estabelecidos neste trabalho. A referida sequência metodológica objetiva principalmente identificar de que modo a variação dos parâmetros de processamento

do material impacta a redução do consumo de matéria-prima e dos custos do processo.

O método em questão é, portanto, industrialmente relevante uma vez que a redução dos custos inerentes a processos está diretamente ligada a uma maior eficiência, e por conseguinte, a uma maior competitividade. Além disso, a avaliação e controle dos custos de produção são essenciais para a tomada de decisões estratégicas por parte das empresas, além de permitirem a otimização da produção e a consequente maximização dos lucros. A Figura 4 apresenta o fluxograma com as principais etapas realizadas durante este trabalho.

Figura 4 - Sequência de obtenção, processamento e análise dos materiais investigados



Fonte: Autor

4.3 Preparação e caracterização das matérias-primas

A Argila do Acará foi submetida a um processo prévio de secagem natural, seguido por uma secagem controlada em estufa a 105°C por 24 horas, afim de se eliminar qualquer teor de umidade. Em seguida, o material foi submetido a cominuição, realizada manualmente com o auxílio de almofariz e pistilo, para promover a desagregação dos aglomerados presentes. Posteriormente, realizou-se o peneiramento com uma malha de abertura de #60 (250 µm) para assegurar que o material estivesse com a granulometria desejada.

O pó de aciaria, por sua vez, também foi submetido a um processo de secagem controlada a 105°C por 24 horas, seguido de peneiramento com uma malha de abertura de #60, garantindo a uniformidade granulométrica requerida.

Os procedimentos acima mencionados, foram fundamentais para garantir que ambos os materiais apresentassem uma granulometria uniforme, além de estarem livres de umidade, promovendo, assim, as condições necessárias para as etapas subsequentes de processamento e caracterização.

4.3.1 Difração de raios X

No presente estudo, a caracterização das amostras de Argila do Acará e de pó de aciaria foi realizada mediante difração de raios X (DRX). O DRX é uma técnica analítica amplamente utilizada na identificação e quantificação de fases cristalinas presentes nos materiais (Vaz Neto, 2023). As referidas análises se deram por meio de um difratômetro de raios X modelo Empyrean da PANalytical. No equipamento, foram utilizados tubos cerâmicos de raios X com anodo de Co ($K\alpha_1 = 1,789010 \text{ \AA}$), foco fino longo e filtro $K\beta$ de Fe. O detector utilizado foi o PIXCEL3D-Medpix3 1x1 e o modo de operação foi o *scanning*, com potencial de 40 kV e corrente de 35 mA; a varredura foi de 4° a 100° 2 θ , com tamanho de passo de 0,026° em 2 θ , e tempo/passo de 30 s. Para otimizar a qualidade dos resultados, foram aplicadas configurações específicas, como uma fenda divergente de 1/4°, antiespalhamento de 1/2° e máscara de 10 mm. As análises de DRX foram conduzidas no Laboratório de Caracterização Mineral (LCM), nos setores de Raios X e Análises do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará (IG/UFPa).

4.4 Formulações

Neste trabalho, foram adotadas três formulações distintas como objeto de investigação, para a produção dos corpos de prova. Cada formulação apresenta diferentes proporções de pó de aciaria e Argila do Acará. A primeira formulação (F1), também designada PA9010, é composta por 90% de argila e 10% de pó de aciaria. A segunda formulação (F2), identificada como PA8020, possui 80% de argila e 20% de pó de aciaria. Finalmente, a terceira formulação (F3) ou A100, é composta exclusivamente por argila e serve de referência para as outras duas formulações.

As formulações utilizadas no processo experimental foram essenciais para avaliar os efeitos da variação das proporções de pó de aciaria e argila nas propriedades e características do material. A escolha desses percentuais foi baseada em estudos precedentes, e nas características desejadas segundo as normas consultadas. A Tabela 1 apresenta as formulações em questão.

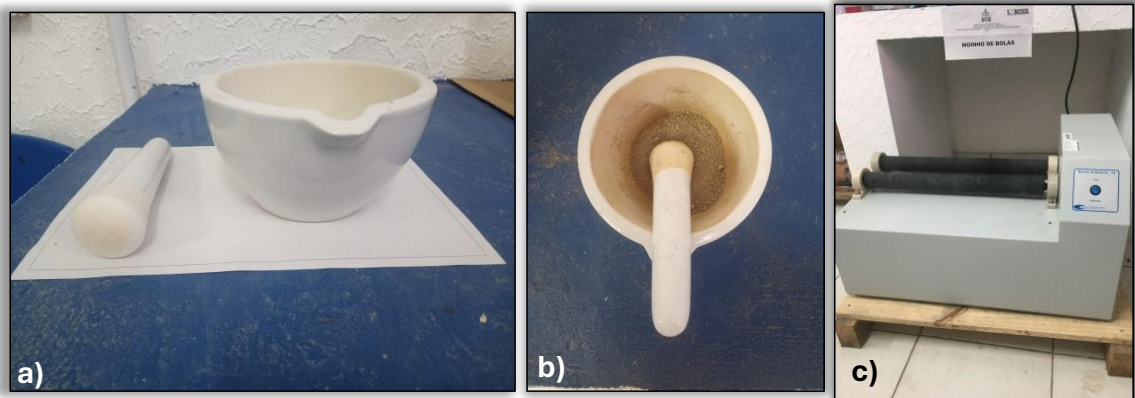
Tabela 1 - Formulações consideradas neste estudo

Formulação	Pó de Aciaria (%)	Argila do Acará (%)
F1 (PA9010)	10	90
F2 (PA8020)	20	80
F3 (A100)	-	100

Fonte: Autor

As amostras de argila do Acará e pó de aciaria foram misturadas e homogeneizadas de maneira seca em moinho de bolas durante 30 min, nas proporções anteriormente indicadas. A Figura 5 apresenta os utensílios e moinho de bolas empregados nesta etapa.

Figura 5 – a) almofariz, b) pistilo e c) moinho de bolas utilizados



Fonte: Autor

4.5 Conformação

A etapa de conformação dos corpos de prova (CPs) foi realizada mediante prensagem uniaxial, com o auxílio de uma prensa hidráulica mecânica operada manualmente (Figura 6). Antes do processo de conformação, o material foi umedecido com água até atingir um teor de umidade aproximado de 8%, para lhe conferir maior plasticidade, facilitando, assim, a sua moldagem. A metodologia adotada para a produção dos CPs baseou-se em Hildebrando *et al.* (2014), com algumas modificações. Os corpos de prova foram confeccionados em moldes de aço, com dimensões 60 mm x 20 mm x 10 mm, e prensados a 250 kgf/cm².

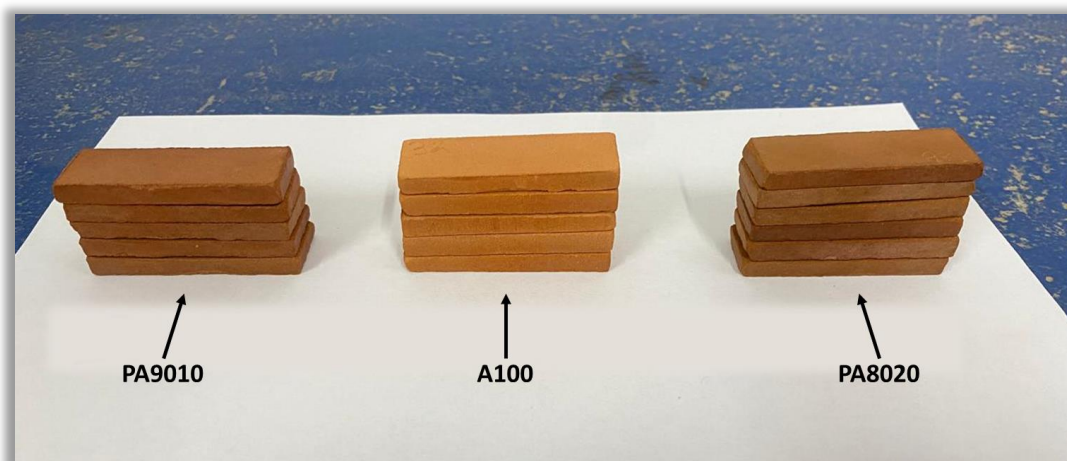
Figura 6 - Prensa hidráulica manual FORTG®, utilizada na conformação dos corpos de prova



Fonte: Autor

Ao todo, foram produzidos dez corpos de prova para cada formulação e parâmetros de queima adotados, totalizando 90 CPs. Esses corpos de prova foram identificados de acordo com a formulação, permitindo a análise subsequente considerando as diferentes composições e condições de queima. Na Figura 7, observam-se alguns dos referidos corpos de prova.

Figura 7 - CPs pós-conformação



Fonte: Autor

4.6 Queima dos corpos de prova

O processo de queima dos corpos de prova é uma etapa essencial para conferir as propriedades desejadas de resistência mecânica, além de estabilidade às peças cerâmicas. Antes do referido processo, os CPs foram submetidos novamente a um processo de secagem controlada, com duração de 24 horas, para remover a umidade residual e evitar possíveis defeitos, como trincas e deformações, durante a queima.

Em seguida, o processo de sinterização dos CPs se deu em um forno elétrico da marca SolidSteel®, operando a uma taxa constante de variação de temperatura. Esse processo foi realizado a uma temperatura máxima de 900°C, com ciclos de queima de 60 min, 120 min e 180 min, sendo o resfriamento conduzido naturalmente até que os corpos de prova atingissem a temperatura ambiente. Vale ressaltar que a taxa de aquecimento adotada é um parâmetro crucial, uma vez que garante a prevenção de estresse térmico excessivo, além de promover uma queima uniforme das peças. A Figura 8, apresenta o forno utilizado no processo em questão e a disposição dos CPs em relação a este durante a queima.

Figura 8 - Forno mufla utilizado para sinterização e disposição dos corpos de prova



Fonte: Autor

4.6.1 Curva de queima

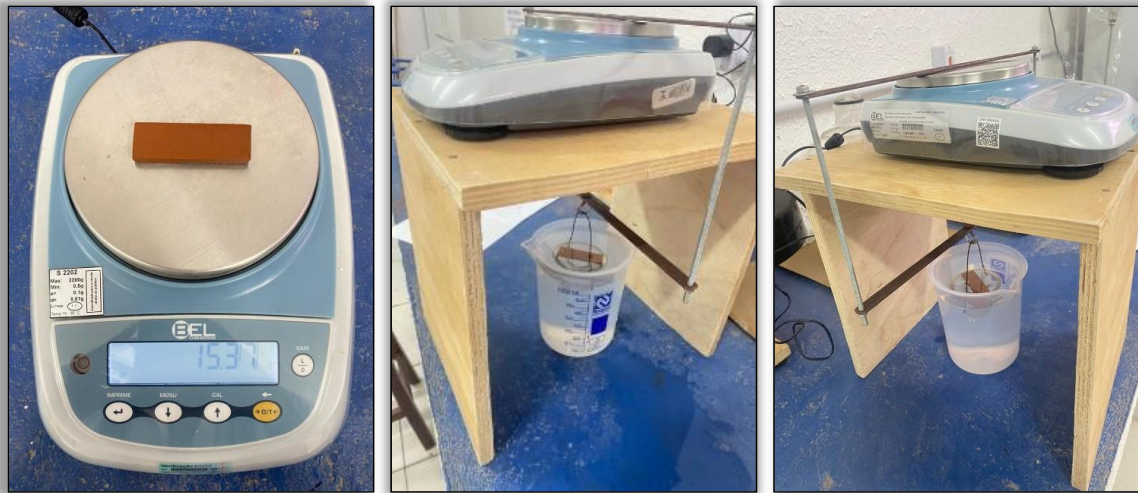
A partir da programação da taxa de aquecimento no controlador do forno, foi possível também plotar os perfis térmicos para os três casos analisados, os quais indicam a variação da temperatura em função do tempo durante os processos de sinterização. Essas curvas permitem acompanhar a evolução da queima, desde a temperatura inicial até a temperatura final desejada. Neste trabalho, foram verificadas as temperaturas a cada 15 minutos até que fosse atingido o patamar de 900°C e, em seguida, as medições foram realizadas a cada 30 min até o fim dos intervalos de 60 min, 120 min e 180 min adotados. Posteriormente, verificou-se as temperaturas após 24 horas do início do processo.

4.7 Determinação das propriedades físicas e cerâmicas dos CPs

A determinação das propriedades físicas, mecânicas e cerâmicas dos corpos de prova sinterizados é importante para avaliar a qualidade e o desempenho das peças cerâmicas. Nesse sentido, primeiramente, foram realizadas medições da massa dos corpos de prova antes e após a queima, permitindo, desse modo, calcular o percentual de perda ao fogo (PF), um indicador da quantidade de massa volatilizada durante o referido processo. Adicionalmente, verificou-se a diferença dimensional dos CPs antes e após a sinterização, para se determinar a Retração Linear de Sinterização (RL), a qual é importante para avaliar a contração durante o processo de sinterização, refletindo a densificação das peças cerâmicas (Souza Santos; Santos, 1989).

Os ensaios para se determinar as propriedades cerâmicas das amostras basearam-se na norma ABNT NBR 15270/2023. Inicialmente, foi avaliada a massa seca do material, seguida do teste de imersão, em que os corpos de prova foram submersos em água por 24 horas, e posteriormente avaliadas as massas úmida e imersa dos materiais. Para tanto, utilizou-se uma balança de precisão Bel® Científica, modelo S2202. A Figura 9 apresenta alguns registros realizados durante as citadas etapas.

Figura 9 - Balança de precisão utilizada para a medição das massas dos corpos de prova



Fonte: Autor

Com base nessas medições foram determinadas as propriedades de Absorção de Água (AA), Porosidade Aparente (PA) e Massa Específica Aparente (MEA), que são indicadores relevantes da capacidade de absorção de água e da porosidade das peças cerâmicas, conforme detalhado por Souza Santos e Santos (1989).

A seguir, são apresentados as expressões para a determinação de cada uma dessas propriedades.

4.7.1 Perda ao fogo

A perda ao fogo observada nos materiais, foi determinada a partir da Equação (1):

$$PF = \frac{M_S^* - M_S}{M_S^*} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

em que:

- M_S^* representa o valor da massa do CP seco anterior à queima (g) e
- M_S representa o valor da massa do CP seco após a queima (g).

4.7.2 Absorção de água

A absorção de água observada nos materiais, foi determinada a partir da Equação (2):

$$AA = \frac{M_U - M_S}{M_S} \times 100 \quad (\%) \quad (2)$$

Onde M_U representa o valor da massa do CP úmido após a queima (g).

4.7.3 Porosidade aparente

A porosidade aparente observada nos materiais, foi determinada a partir da Equação (3):

$$PA = \frac{M_U - M_S}{M_U - M_I} \times 100 \quad (\%) \quad (3)$$

Em que M_I representa a massa do CP imerso após a queima (g).

4.7.4 Retração linear

A retração linear de sinterização observada nos materiais, foi determinada a partir da Equação (4):

$$RL = \frac{L_0 - L_1}{L_0} \times 100 \quad (\%) \quad (4)$$

Onde:

- L_0 representa o comprimento inicial do CP (mm) e
- L_1 representa o comprimento do CP após a queima (mm).

4.7.5 Massa específica aparente

A massa específica aparente observada nos materiais, foi determinada a partir da Equação (5):

$$MEA = \frac{\rho M_s}{M_U - M_I} \quad (\text{g/cm}^3) \quad (5)$$

Onde:

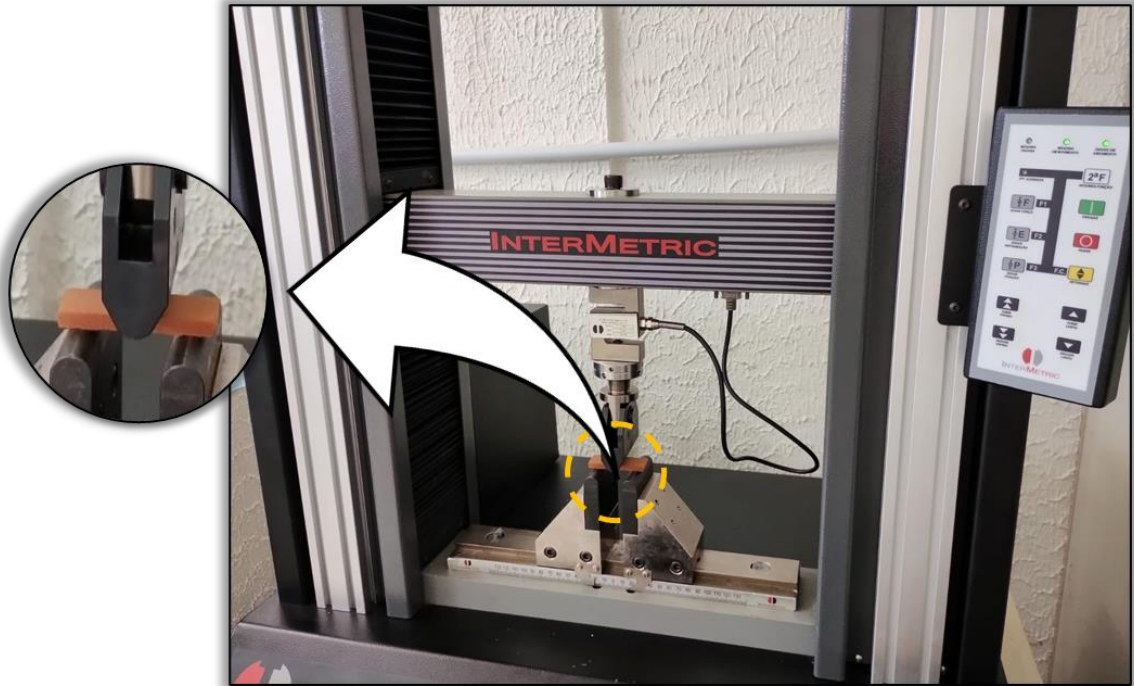
- ρ representa a densidade da água.

4.8 Ensaios mecânicos dos CPs

Como etapa final, seguiu-se o ensaio mecânico de flexão dos corpos de prova. O principal objetivo desse ensaio é verificar a Tensão de Ruptura à Flexão (TRF), que representa a carga máxima suportada pelo material antes de ocorrer a fratura. Os procedimentos foram realizados conforme as normas ABNT NBR 15270/2023 e ASTM C674-13/2018, que estabelecem diretrizes e critérios a serem adotados durante a realização do ensaio em questão.

Nesse contexto, utilizou-se a máquina de ensaios universais InterMetric®, linha iM, disponibilizada pelo Laboratório de Caracterização de Materiais (LCMat) da Faculdade de Engenharia de Materiais da UFPa. O procedimento adotado foi o de flexão em três pontos, o qual é consideravelmente empregado para esse tipo de análise. Nesse modo, o corpo de prova é bi-apoiado, enquanto a carga é aplicada em um terceiro ponto localizado na região central entre os dois apoios. A distância entre esses apoios, conforme estabelecido nas normas, foi de 40 mm. A Figura 10 representa o registro de um dos CPs submetidos ao teste de flexão.

Figura 10 - Realização do ensaio mecânico de flexão em um CP



Fonte: Autor

As TRFs observadas nos materiais foram determinadas a partir da Equação (6):

$$TRF = \frac{3P \times L}{2b \times h^2} \left(\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \right) \quad (6)$$

Onde:

- P é a força aplicada (kgf);
- L é a distância entre os pontos de apoio (cm);
- b é a largura do CP (cm) e
- h é espessura do CP (cm).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Considerações iniciais

A seguir, serão apresentados os resultados obtidos neste trabalho, assim como suas respectivas análises, conforme a Figura 11.

Figura 11 - Etapas representativas da sequência de análise dos resultados

ENSAIO DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X
▪ Identificação das fases presentes na amostra de Argila do Acará. ▪ Análise da influência das fases identificadas na amostra do referido material sobre as suas propriedades. ▪ Identificação das fases presentes na amostra de pó de aciaria. ▪ Análise da influência das fases identificadas na amostra do referido material sobre as suas propriedades.
AValiação VISUAL DOS CORPOS DE PROVA (CPs)
▪ Identificação do padrão de coloração apresentado pelas amostras das três formulações, considerando diferentes tempos de sinterização.
PROPRIEDADES CERÂMICAS
▪ Resultados dos testes físicos de perda ao fogo (PF), absorção de água (AA), porosidade aparente (PA), retração linear (RL) e massa específica aparente (MEA), realizados para investigar as propriedades cerâmicas das formulações A100 (100% Argila do Acará), PA9010 (90% Argila do Acará e 10% pó de aciaria) e PA8020 (80% Argila do Acará e 20% pó de aciaria).
RESISTÊNCIA MECÂNICA
▪ Resultados dos testes de resistência mecânica das referidas formulações obtidos mediante o ensaio de flexão.

Fonte: Autor

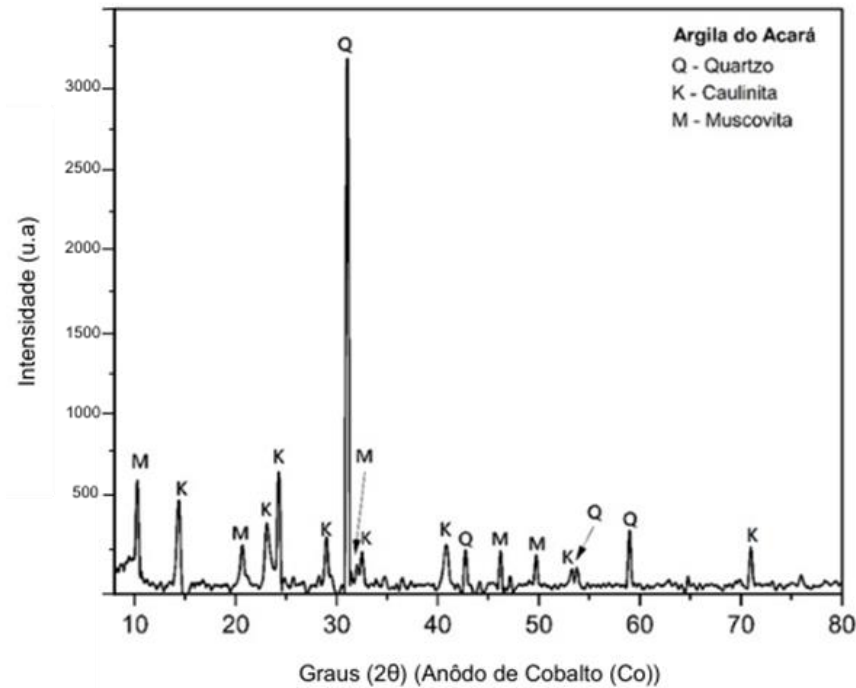
5.2 Difração de raios X

5.2.1 Argila do Acará

Apresenta-se, na Figura 12, o resultado do ensaio de DRX referente à amostra de argila considerada. As seguintes fases minerais estão presentes, conforme é possível observar: quartzo (SiO_2), caulinita ($\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) e muscovita ($\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$). Essas fases são determinantes para as propriedades de

fabricação, principalmente durante a etapa de conformação de determinados materiais cerâmicos, como é o caso da cerâmica vermelha, por exemplo.

Figura 12 - DRX da argila do Acará



Fonte: Autor

O quartzo (SiO_2) atua como material inerte na constituição da cerâmica vermelha e contribui para a estabilidade dimensional do material. Contudo, altas concentrações do referido mineral podem provocar maior ocorrência de porosidades no material, bem como diminuir a sua resistência mecânica à flexão (Vaz Neto, 2023).

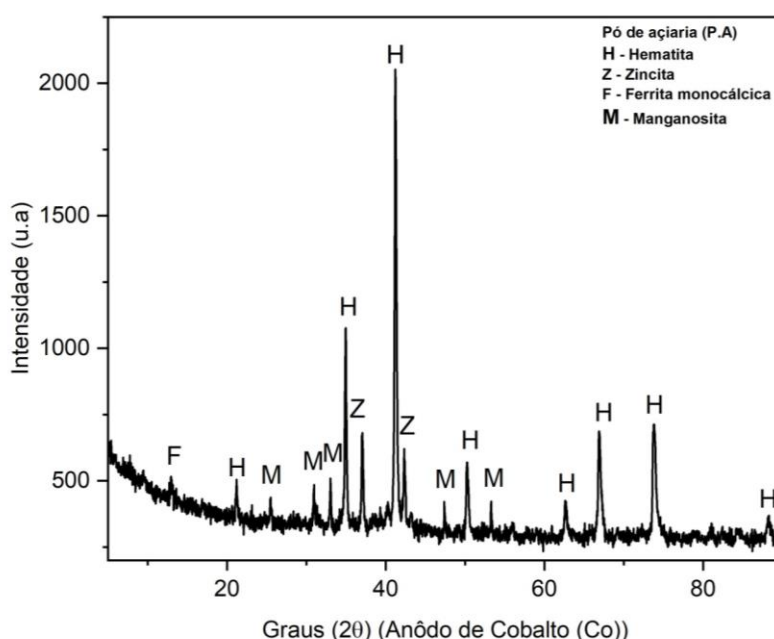
A caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), por sua vez, melhora a plasticidade e resistência mecânica da cerâmica que compõe. Entretanto, excessos nas concentrações de caulinita podem levar a problemas de deformação durante o processo de sinterização da cerâmica (Vaz Neto, 2023).

Finalmente, a presença de muscovita ($\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$) em materiais cerâmicos influencia diversas propriedades no produto final, as quais podem variar dependendo da quantidade e modo de incorporação à mistura. Dentre essas propriedades, destacam-se: aumento da plasticidade, redução da temperatura de transformação e estabilidade dimensional. Vale ressaltar que em algumas formulações a muscovita é capaz de aumentar a porosidade do material, afetando a absorção de água do produto final (Ribeiro *et al.*, 2011; Pereira *et al.*, 2014).

5.2.2 Pó de aciaria

A Figura 13 apresenta o difratograma obtido mediante a análise de DRX correspondente à amostra de pó de aciaria. Ao se analisar a referida figura, é possível identificar as seguintes fases: hematita (Fe_2O_3), zincita (ZnO), ferrita monocálcica (CaFe_2O_4) e manganosita (MnO).

Figura 13 - DRX do pó de aciaria



Fonte: Autor

Os compostos identificados na amostra de pó de aciaria são oriundos, em sua maioria, do processo de produção de aço, desde a fusão à manipulação; e podem ser utilizados ou reciclados para outros fins em processos industriais, como a produção de materiais cerâmicos. Nesse sentido, os referidos compostos também influenciam o comportamento das cerâmicas quanto às suas propriedades.

A presença da hematita na constituição do material cerâmico resulta, por exemplo, em uma maior resistência mecânica. Todavia, altas concentrações desse composto podem diminuir a tenacidade e a resistência ao choque térmico, devido à formação de fases secundárias menos estáveis. O óxido de zinco, por sua vez, pode ser associado ao controle da viscosidade e atua como agente fundente, diminuindo o ponto de fusão de massas cerâmicas. Além disso, o ZnO é capaz de aumentar a

resistência à tração e ao impacto (Kingery; Bowen; Uhlmann, 1976; Moura *et al.*, 2005; Moura *et al.*, 2012).

O óxido de cálcio auxilia na redução da temperatura de fusão das cerâmicas, além de aumentar a resistência térmica. Ademais, esse composto tem a capacidade de alterar a microestrutura do material, promovendo a formação de fases cristalinas estáveis, aumentar a dureza e a resistência ao desgaste. Contudo, em concentrações elevadas, pode tornar o material cerâmico mais poroso ou quebradiço (Rios, 2014; Alford *et al.*, 2008).

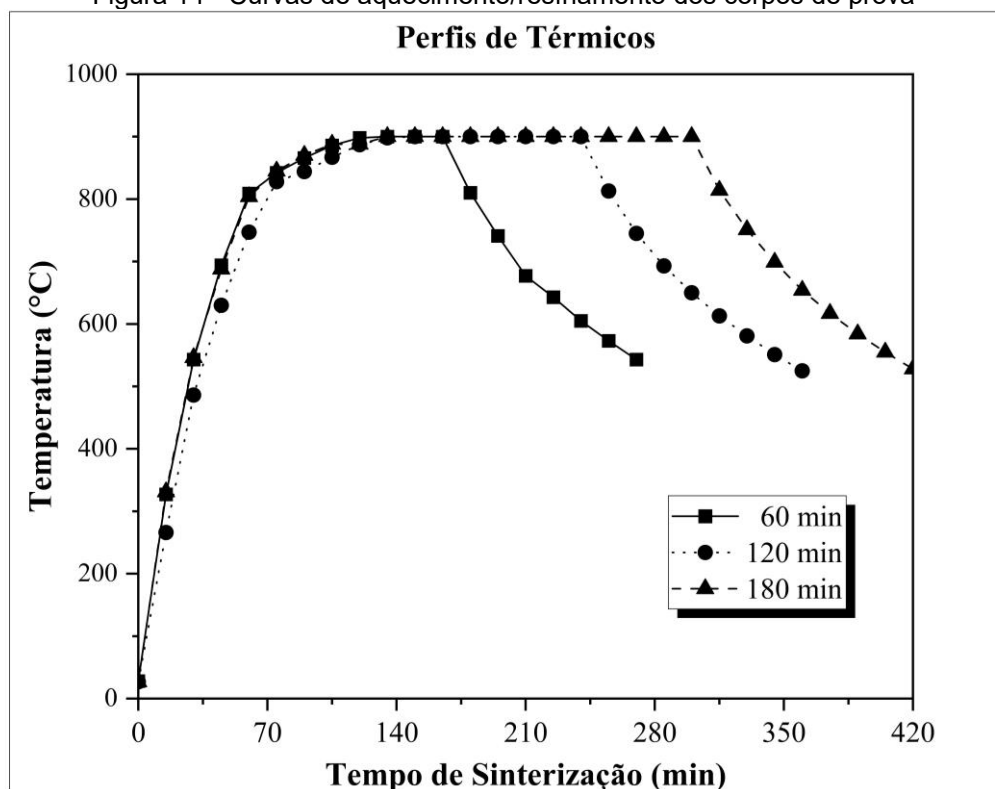
A presença do óxido de manganês promove um aumento da resistência mecânica e a dureza da cerâmica; em certas concentrações, é capaz de aumentar a resistência à corrosão e à abrasão. Além disso, a depender da concentração e das condições de queima, o referido composto pode conferir tons de marrom, roxo ou até mesmo negro aos materiais cerâmicos que constitui (Pereira *et al.*, 2016; Phillips, 2009).

Finalmente, entende-se como fundamental a realização de uma análise cuidadosa da composição do pó de aciaria, bem como considera-la como um parâmetro de controle na produção da cerâmica. A seleção adequada do pó de aciaria como matéria-prima e o monitoramento preciso das proporções dos citados compostos podem ajudar a minimizar os efeitos negativos e otimizar as propriedades dos produtos cerâmicos finais (Vaz Neto, 2023).

5.3 Perfis de temperaturas

A Figura 14, apresenta os perfis térmicos de queima dos corpos de prova sinterizados. As referidas curvas, permitem que os comportamentos térmicos dos corpos de prova sejam avaliados, tornando possível a identificação da necessidade de ajustes a serem realizados nos parâmetros de sinterização, a fim de que sejam obtidas as propriedades desejadas. Observam-se, na referida figura, os diferentes estágios e tendências relativas à temperatura em função do tempo. Além disso, vê-se que até que a temperatura de sinterização (900°C) fosse atingida, todas as amostras foram aquecidas a uma taxa aproximadamente igual. Vale ressaltar que, durante a etapa de aquecimento, ocorrem fenômenos como desidratação, dissolução de compostos orgânicos e a evolução da cerâmica.

Figura 14 - Curvas de aquecimento/resfriamento dos corpos de prova



Fonte: Autor

No estágio seguinte ao aquecimento dos corpos de prova, a temperatura é mantida constante por determinado intervalo de tempo, no contexto deste trabalho, a 60 min, 120 min e 180 min. Nessa fase, ocorrem importantes fenômenos físico-químicos como o estabelecimento de reações químicas, a recristalização e aumento da massa específica do material. Por fim, segue-se a etapa de resfriamento das amostras, na qual efetua-se a estabilização da estrutura cerâmica, de modo que tensões internas e possíveis deformações sejam atenuadas ou, até mesmo, evitadas.

5.4 Propriedades físicas

As Figuras abaixo apresentam os resultados dos testes realizados para a verificação da variação de umidade e perda de massa das amostras de Argila do Acará e pó de aciaria, submetidas a uma temperatura de 105°C em estufa, por cerca de 5 e 6 horas, respectivamente. As referidas propriedades físicas foram medidas em intervalos de 30 min, até que fosse constatada a estabilização de seus resultados.

Figura 15 - Perfis de umidade e perda de massa em função do tempo para a argila do Acará

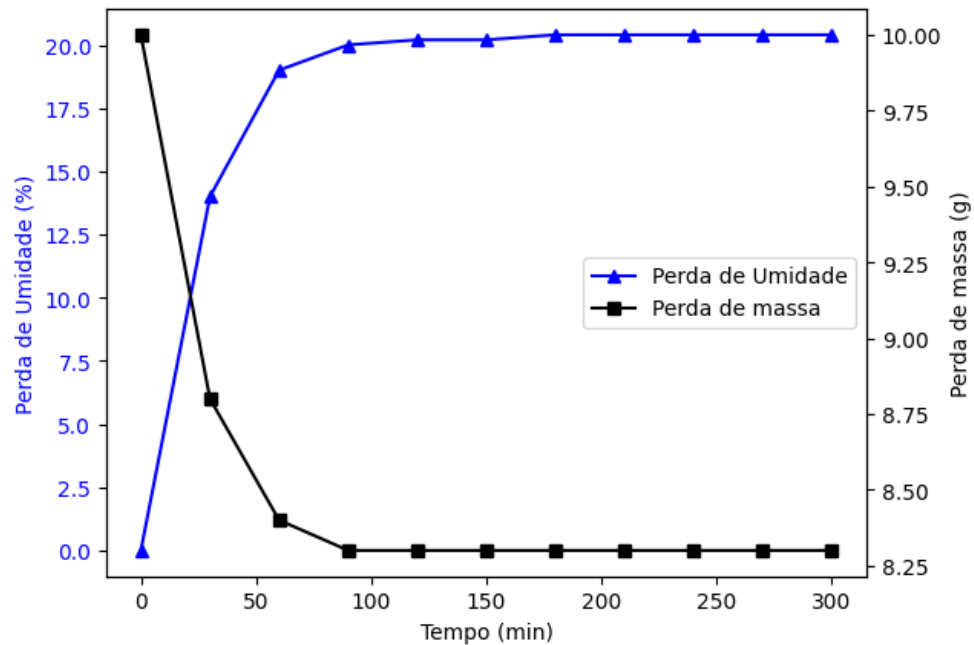
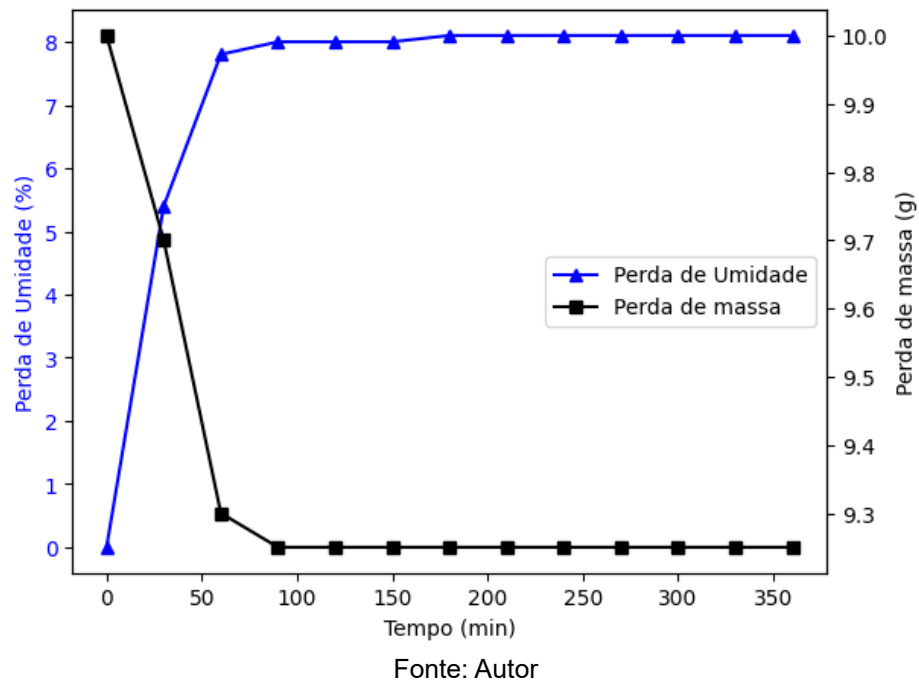


Figura 16 - Perfis de umidade e perda de massa em função do tempo para o pó de aciaria



A análise dos gráficos acima apresentados permite observar que a maior parte da água foi removida nas primeiras horas, o que é essencial para se evitar o surgimento de trincas e explosões dentro do forno.

5.5 Avaliação visual macroscópica dos CPs

A avaliação visual macroscópica dos corpos de prova (CPs) após a queima permite identificar os padrões de cores apresentados por eles durante os processos de sinterização. Essa análise pode fornecer informações acerca da composição e propriedades dos materiais cerâmicos. Nesse sentido, a Figura 17 apresenta as colorações desenvolvidas por três amostras dos CPs de Argila do Acará após a queima a 60 min, 120 min e 180 min, respectivamente. Similarmente, a Figura 18 e Figura 19 demonstram as colorações apresentadas por amostras dos CPs produzidos com as formulações PA9010 e PA8020, nessa ordem.

A presença de determinados componentes, como óxidos metálicos, minerais e impurezas, podem influenciar na coloração apresentada pela cerâmica. Elevados teores de hematita, por exemplo, pode resultar em tonalidades avermelhadas. Além disso, a avaliação das cores de queima pode ser útil para otimizar o processo de sinterização.

Figura 17 - Corpos de prova da formulação A100 sinterizados



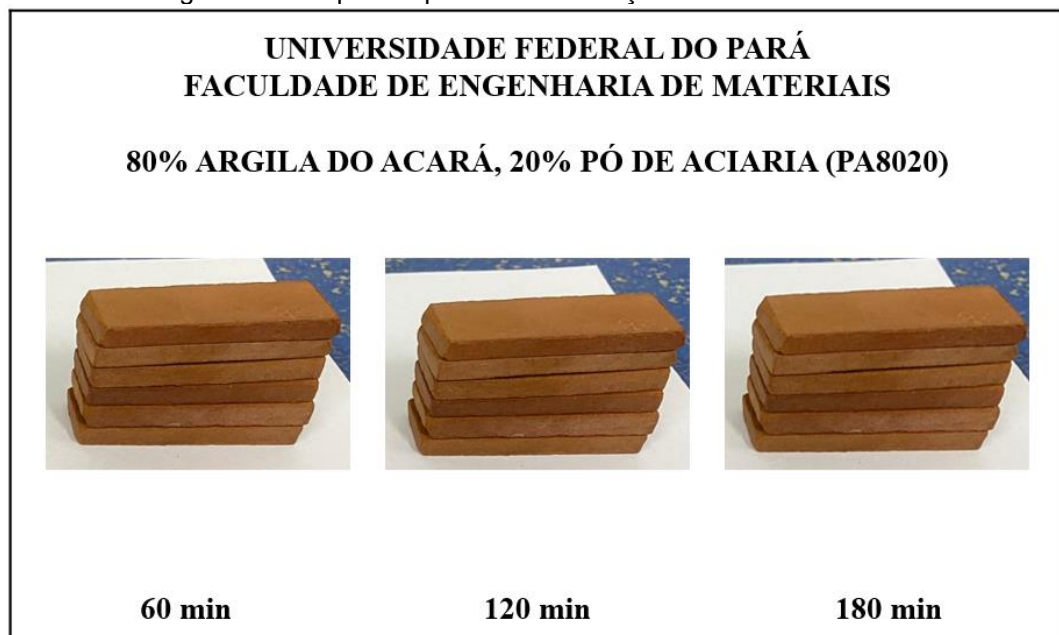
Fonte: Autor

Figura 18 - Corpos de prova da formulação PA9010 sinterizados



Fonte: Autor

Figura 19 - Corpos de prova da formulação PA8020 sinterizados



Fonte: Autor

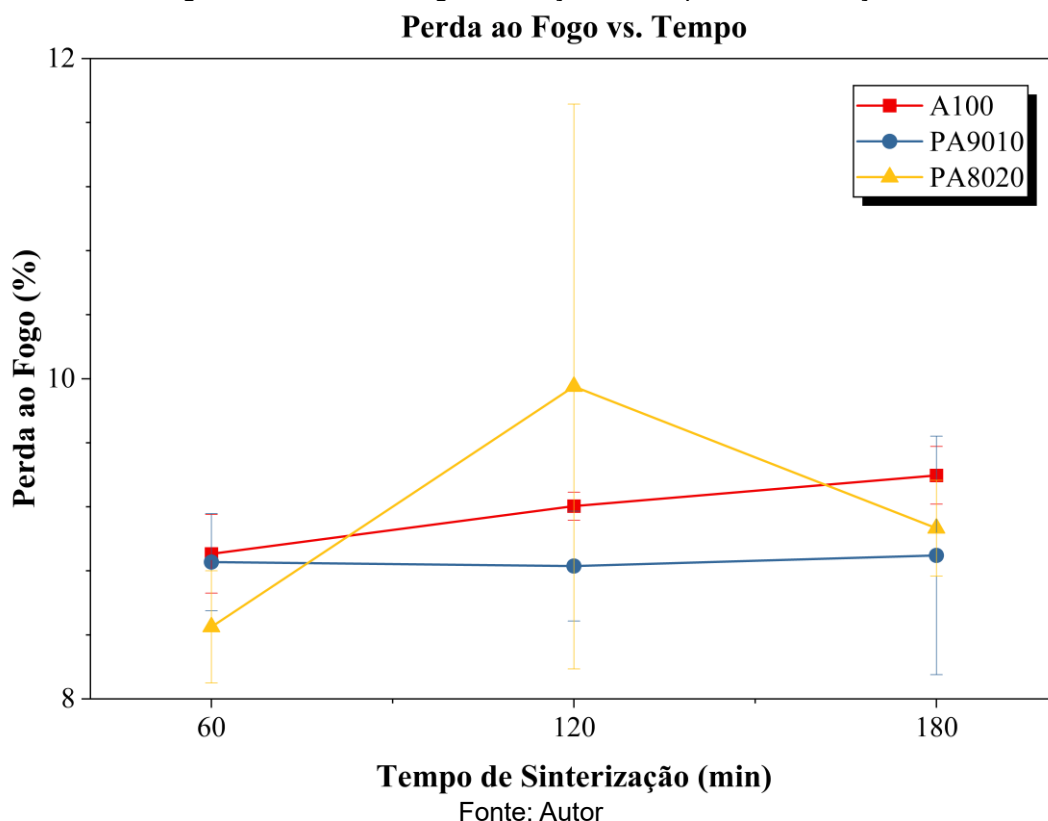
5.6 Propriedades cerâmicas

5.6.1 Perda ao fogo

A Figura 20, apresenta o gráfico com os resultados das análises de perda ao fogo (PF) das amostras das formulações investigadas. A formulação A100 apresentou

um aumento no percentual de perda ao fogo para os tempos 120 min e 180 min, enquanto a formulação PA9010 quase não apresentou variação de PF em relação ao tempo de 60 min. Vale destacar o comportamento do material PA8020, o qual variou significativamente para os três tempos de sinterização analisados, com uma tendência de queda nos valores de PF.

Figura 20 - Perda ao fogo em função do tempo de sinterização



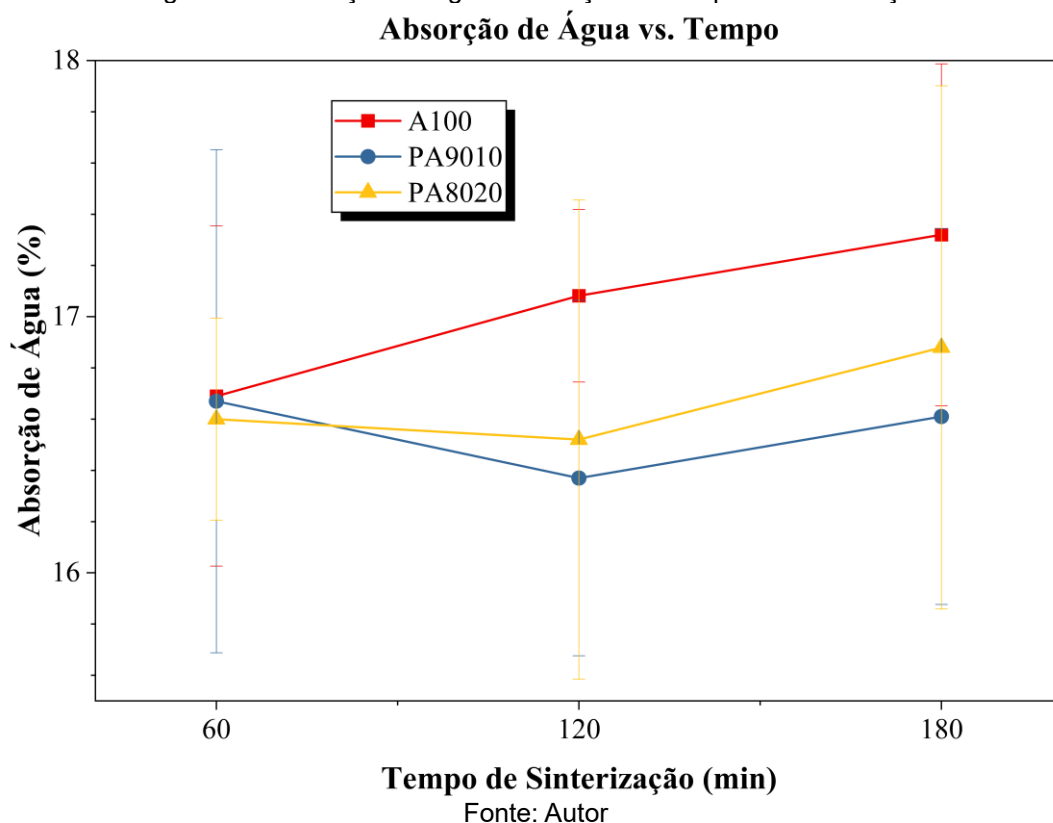
Segundo estudos disponíveis na literatura, há fatores que contribuem para o aumento ou diminuição de PF nas cerâmicas, como a presença de matéria orgânica em sua composição (Mendonça *et al.*, 2020).

5.6.2 Absorção de água

A Figura 21 apresenta os resultados do ensaio de absorção de água (AA) para os corpos de prova submetidos aos diferentes tempos de sinterização. A investigação dessa propriedade é fundamental para garantir durabilidade e desempenho adequados desses materiais em aplicações na construção civil. Assim, observa-se que, para a formulação A100, não houve um aumento significativo na AA considerando

os tempos de 60 min e 120 min. Por outro lado, as amostras de PA9010 e PA8020 apresentaram uma diminuição no percentual de absorção de água no tempo de 120 min, seguida por um aumento a 180 min de sinterização.

Figura 21 - Absorção de água em função do tempo de sinterização



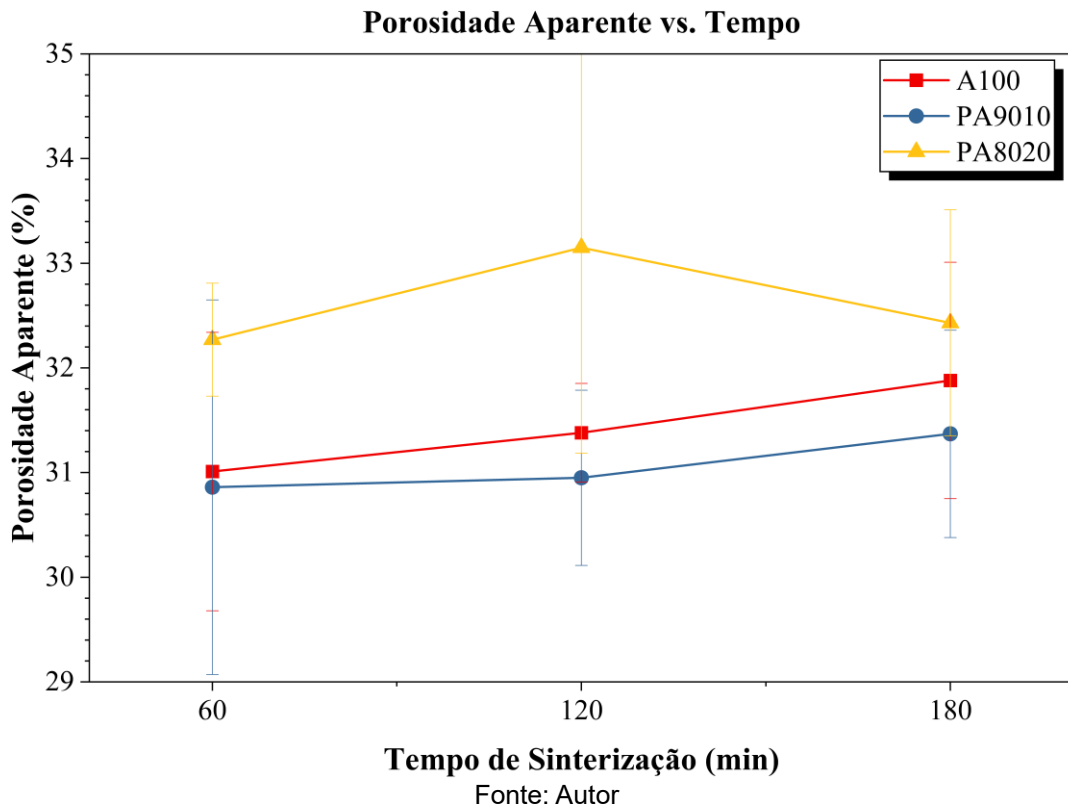
O comportamento acima descrito pode ser considerado incomum, uma vez que, devido ao aumento da massa específica da cerâmica durante o processo de sinterização a altas temperaturas, ocorre também a redução da porosidade do material, o que naturalmente diminui a sua capacidade de absorver água; tal fato aponta para a necessidade de estudos mais aprofundados acerca dos resultados acima observados. De acordo com a norma ABNT NBR 15270-1/2023, que trata das especificações para blocos e tijolos para alvenaria, considerando a classe de blocos e tijolos para vedação 15 (VED15), o valor de AA deve estar contido no intervalo de 8% a 25%.

Dessa forma, conclui-se que as três formulações analisadas se enquadram nos requisitos estabelecidos pela norma acima citada para blocos de vedação.

5.6.3 Porosidade aparente

O comportamento dos corpos de prova quanto à avaliação da porosidade aparente (PA) é apresentado na Figura 22. A PA relaciona-se diretamente à absorção de água, isto é, quanto maior a porosidade aparente apresentada pela cerâmica, maior será a AA. Essa relação se dá pelo fato de os poros presentes no material favorecerem a entrada e acúmulo de líquidos em sua estrutura. Além disso, a porosidade do material pode influenciar também o seu comportamento em termos de resistência mecânica e permeabilidade (Santos; Santos, 1989; Carter; Norton, 2013; Vaz Neto, 2023).

Figura 22 - Porosidade aparente em função do tempo de sinterização



Observa-se, no gráfico em questão que, para as formulações A100 e PA8020, a PA praticamente permanece a mesma, apresentando o menor valor para a amostra de A100 a 60 minutos. Na formulação A100, é possível observar ainda um aumento no percentual de PA, enquanto as amostras de PA8020 apresentam uma acentuada diminuição quando submetidas a um intervalo de tempo de 180 min. Quanto à formulação PA9010, nota-se um aumento sutil no valor de PA para 120 min, quando

comparado ao resultado para o tempo de sinterização de 60 min. A amostra correspondente à referida formulação submetida a um tempo de 180 min, apresenta um aumento significativo no valor de PA. Recomenda-se a realização de investigações mais aprofundadas a fim de se compreender as causas dos comportamentos verificados.

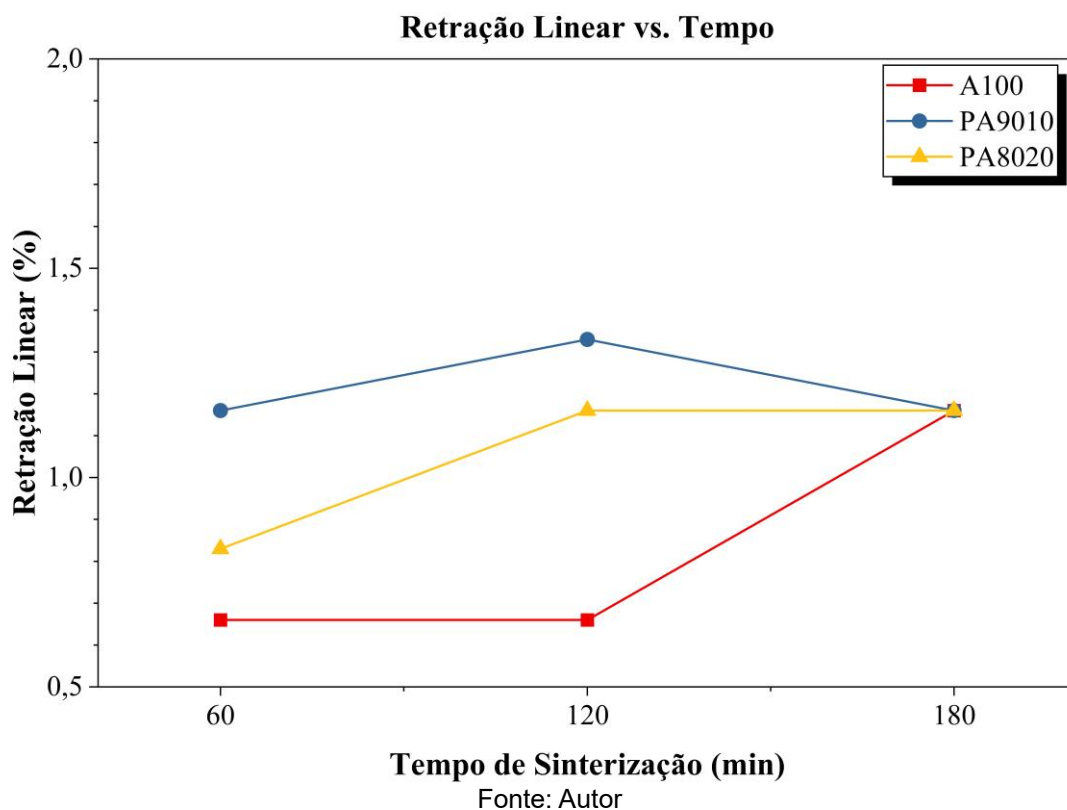
É importante salientar que, segundo Vaz Neto (2023), a porosidade aparente também pode ser favorável, dependendo do tipo de aplicação a ser atribuída ao produto cerâmico final. Nesse contexto, cerâmicas com maiores valores de PA têm aplicações relevantes como, por exemplo, em materiais refratários para os quais a porosidade controlada contribui para um aumento na capacidade de isolamento térmico, além de melhorar a resistência ao choque térmico.

5.6.4 Retração linear

Observou-se nas amostras analisadas, uma variação da retração linear (RL) entre os valores de 0,5% a 1,5%. Esse intervalo pode ser justificado pelas características específicas apresentadas por cada material, bem como pelas condições de processamento adotadas. A Figura 23 apresenta os valores médios referentes aos resultados de RL para as amostras, considerando os diferentes tempos de sinterização.

É importante destacar que a retração linear de sinterização é um fenômeno que ocorre naturalmente em materiais cerâmicos por conta de processos de difusão e rearranjo de partículas durante a queima. Uma vez que esse fenômeno pode alterar as dimensões finais dos produtos cerâmicos, faz-se necessário o controle de seus efeitos para que essas variações dimensionais obedeçam aos limites estabelecidos em normas como a ABNT NBR 15270-1, garantindo assim a conformidade e qualidade dos produtos.

Figura 23 - Retração linear em função do tempo de sinterização



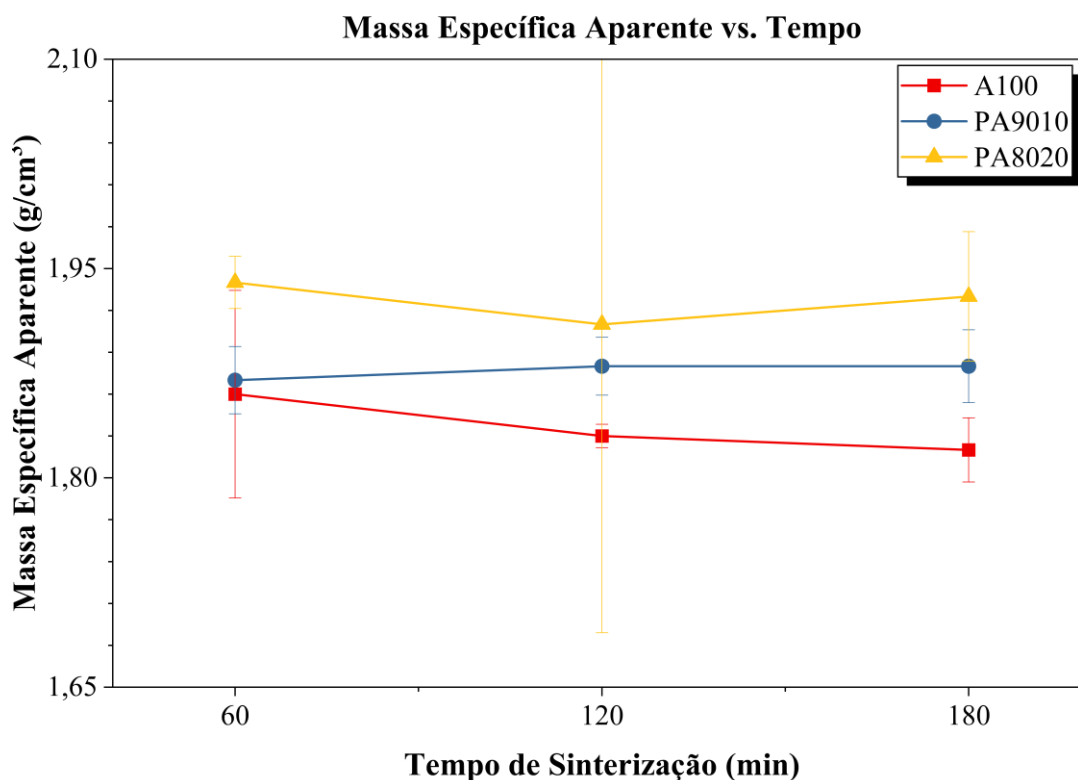
5.6.5 Massa específica aparente

A massa específica aparente está relacionada à uma maior resistência mecânica e durabilidade dos materiais cerâmicos; sendo, portanto, considerada uma importante propriedade para a definição de parâmetros em projetos de engenharia. Assim, materiais cerâmicos que apresentem valores inadequados de MEA podem comprometer o desempenho e a segurança das estruturas que compõem.

As amostras analisadas apresentaram pequenas variações no valor de massa específica aparente (MEA) ao serem submetidas a diferentes tempos de queima (Figura 24). Durante o processo de sinterização, acontece a fusão parcial de partículas e a formação de novas ligações químicas, o que resulta em uma maior densificação e consequente aumento da MEA. Ao se observar o gráfico presente na figura em questão, verifica-se que somente as amostras com formulação PA9010 se comportaram da forma descrita. As amostras de PA9010 e A100 apresentaram, após um tempo de 180 min, praticamente o mesmo valor de massa específica aparente verificado para um tempo de sinterização de 120 min e um menor valor em relação ao tempo de 60 min.

Segundo estudos publicados (SANTOS; SANTOS, 1989), os valores de MEA recomendados para argilas utilizadas na produção de cerâmica vermelha estão entre $1,7 \text{ g/cm}^3$ e $2,1 \text{ g/cm}^3$. Desse modo, de acordo com os resultados apresentados na Figura 24, todas as formulações das amostras investigadas atenderam a essa especificação.

Figura 24 - Massa específica aparente em função do tempo de sinterização

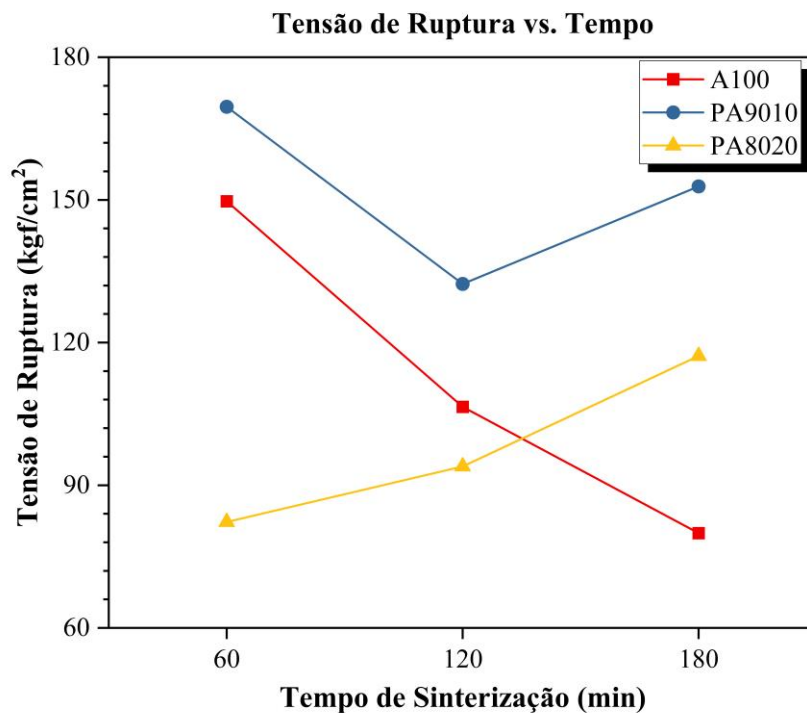


5.6.6 Resistência mecânica à flexão

Apresentam-se, na Figura 25, os módulos de ruptura à flexão das amostras em função do tempo de sinterização. As amostras compostas pela formulação PA9010 destacaram-se por apresentarem maiores valores de tensão de ruptura, sendo, portanto, mais resistentes em relação às amostras das demais formulações. Além disso, as amostras de PA8020 obtiveram um aumento na resistência mecânica nos diferentes tempos de sinterização analisados. Já para as amostras de A100, houve uma diminuição linear dos valores de tensão de ruptura nos intervalos de tempo analisados. Esses comportamentos podem ser atribuídos aos parâmetros adotados, além das composições dos materiais e dos processos de queima.

Vale ressaltar que esses resultados podem ter sido influenciados por diversos fatores, como porosidade, distribuição granulométrica, estrutura cristalina e massa específica dos materiais cerâmicos investigados. Em vista disso, é imprescindível considerar esses aspectos ao se comparar e buscar melhorias nos desempenhos desses materiais.

Figura 25 - Tensão de ruptura em função do tempo de sinterização



Fonte: Autor

Estudos mostram que variáveis como tempo e temperatura nos processos de queimas das cerâmicas podem impactar significativamente as suas propriedades mecânicas, incluindo a tensão de ruptura. Assim, alterações nesses parâmetros podem melhorar, ainda mais, a resistência mecânica da cerâmica vermelha.

5.6.7 Classificação baseada nas propriedades cerâmicas

A Tabela 2, mostra os resultados anteriormente apresentados para as propriedades dos materiais cerâmicos investigados neste trabalho, onde também constam os valores determinados de desvio padrão (s) com o subíndice indicando a propriedade correspondente. A Tabela 3, destaca as propriedades obtidas a partir de

normas e da literatura para três aplicação, são elas: blocos e tijolos de vedação (VED), blocos de alvenaria estrutural (EST) e telhas.

Comparando os dados das duas tabelas, observa-se que com relação às categorias VED e EST, as três formulações são viáveis em termos de compatibilidade de propriedades. Para telhas, as formulações que não se enquadram são: A100 a 180 min e PA8020 a 120 min e 60 min. De acordo com a tendência de evolução das propriedades dos materiais apresentados, a formulação PA9010 foi a que se mostrou mais promissora, com base nos parâmetros de sinterização adotados.

Tabela 2 - Propriedades das diferentes formulações, de acordo com os respectivos tempos de queima

60 min										
Formulação	PF (%)	SPF (%)	AA (%)	SAA (%)	PA (%)	SPA	RL (%)	MEA (g/cm³)	S_{MEA}	TRF (kgf/cm²)
A100	8,91	0,24	16,69	0,66	31,01	1,33	0,66	1,86	0,07	149,70
PA9010	8,85	0,30	16,67	0,98	30,86	1,79	1,16	1,87	0,02	169,58
PA8020	8,47	0,35	16,60	0,39	32,27	0,54	0,83	1,94	0,02	82,27
120 min										
Formulação	PF (%)	SPF (%)	AA (%)	SAA (%)	PA (%)	SPA	RL (%)	MEA (g/cm³)	S_{MEA}	TRF (kgf/cm²)
A100	9,20	0,09	17,08	0,34	31,38	0,47	0,66	1,83	0,01	106,50
PA9010	8,83	0,34	16,37	0,69	30,95	0,84	1,33	1,88	0,02	132,34
PA8020	9,95	1,76	16,52	0,94	33,15	1,96	1,16	1,91	0,22	93,96
180 min										
Formulação	PF (%)	SPF (%)	AA (%)	SAA (%)	PA (%)	SPA	RL (%)	MEA (g/cm³)	S_{MEA}	TRF (kgf/cm²)
A100	9,40	0,18	17,32	0,67	31,88	1,13	1,16	1,82	0,02	79,94
PA9010	8,90	0,74	16,61	0,73	31,37	0,99	1,16	1,88	0,03	152,83
PA8020	9,07	0,30	16,88	1,02	32,43	1,08	1,16	1,93	0,05	117,17

Fonte: Autor

Tabela 3 - Propriedades de diferentes tipos de cerâmicas de acordo com as normas e literatura

Formulação	AA (%)	PA (%)	RL (%)	MEA (g/cm³)	TRF (kgf/cm²)
Blocos e tijolos de vedação (VED)	8 a 25	<35	<5	1,7 a 2,1	>15
Blocos de alvenaria estrutural (EST)	8 a 21	<35	<3	1,7 a 2,1	>40
Telhas	<20	<35	<2	1,7 a 2,1	>100

Fonte: Vaz Neto (2023)

6 CONCLUSÕES

Os resultados alcançados e a discussão realizados neste trabalho permitem que as seguintes conclusões sejam obtidas:

- As formulações PA9010 e PA8020 adotadas neste trabalho, demonstraram potencial viabilidade na obtenção de cerâmica vermelha, ao atenderem parâmetros de propriedades cerâmicas estabelecidos pelas normas levadas em consideração.
- A formulação PA9010 foi capaz de atender a todos os requisitos para os diferentes tipos de aplicação adotados; de acordo com os parâmetros apresentados na Tabela 2, é possível concluir que os resultados apresentados podem ser considerados promissores.
- Verifica-se, ainda, que a variação no tempo de sinterização dos corpos de prova constituídos pelos materiais investigados, foi fundamental para estabelecer variações nas propriedades desejadas, mas ainda dentro dos parâmetros de aplicação analisados. Isso permite concluir que, além das proporções adotadas para as formulações em questão, o tempo como parâmetro no processo de queima exerce efeitos significativos sobre o comportamento do material.
- Os tempos de queima e a temperatura de sinterização utilizados neste estudo são fatores-chave para a otimização do processo de produção da cerâmica vermelha, além da possível redução nos custos associados à manufatura de materiais cerâmicos.
- As propriedades físicas e mecânicas determinadas demonstraram que as formulações estudadas atendem, em sua maioria, aos requisitos estabelecidos por normas para cerâmica vermelha, especialmente para aplicações como blocos de vedação. Os valores obtidos se mantiveram dentro das faixas recomendadas pela literatura, confirmando a adequação dos materiais produzidos.
- Os ensaios mecânicos realizados evidenciaram desempenho satisfatório dos materiais, com destaque para a formulação PA9010, que apresentou os maiores valores de resistência à flexão, indicando melhor integridade

estrutural e qualidade do produto final. Dessa forma, os resultados confirmam que a incorporação do resíduo não compromete, e em alguns casos melhora, o desempenho mecânico das cerâmicas.

- Finalmente, a incorporação do resíduo nas formulações cerâmicas mostrou-se uma alternativa tecnicamente viável para a obtenção de produtos com valor agregado, uma vez que os materiais resultantes atenderam aos requisitos normativos e apresentaram propriedades adequadas para aplicação industrial. Além disso, essa abordagem contribui para a redução de custos associados à matéria-prima e ao descarte de resíduos, bem como para a mitigação de impactos ambientais.

7 SUGESTÕES PARA A REALIZAÇÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Considerando os resultados alcançados, as discussões realizadas e as conclusões obtidas neste trabalho, as seguintes linhas de pesquisa podem ser sugeridas para o desenvolvimento de trabalhos futuros:

- Expandir a análise realizada neste trabalho para outras formulações de argila e pó de aciaria e
- Realizar estudos com ênfase no aumento da temperatura de queima.

REFERÊNCIAS

- A. R. Phillips, **Ceramic Materials: Science and Engineering**, Springer, 2009.
- ABCERAM – Associação Brasileira da Indústria de Cerâmica. Manual técnico da cerâmica vermelha. São Paulo: ABCERAM, 2024.
- ABNT. **ABNT NBR 15270: Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria**. Brasil, 2017.
- ALFORD, T. L. et al. Effect of calcium oxide addition in ceramic matrices. *Materials Science and Engineering: B*, v. 150, n. 1-3, p. 113–118, 2008.
- ALMEIDA, Paulo Henrique. *Cerâmica vermelha: fundamentos e aplicações*. Fortaleza: Edições UFC, 2023.
- ALVES, Bonifácio Benício de Souza, BENÍCIO, Maylle Alves, WLISSES Antônio. **Gestão e Produção de Cerâmica Vermelha no Nordeste, Especialmente no Município de Parelhas–RN**. UFPB, João Pessoa-PB. 2014
- AZEVEDO, R. M., MENDES, J. G. **Refratários para fornos elétricos de arco: Desafios e avanços na produção de aço**. *Cerâmica*, 67 (2) (2021), 150-163.
- CABRAL JR., Marsis, TANNOA, Luiz Carlo, SINTONIA, Ayrton, MOTTA, José Francisco Marciano, COELHO, José Mário. **A Indústria de Cerâmica Vermelha e o Suprimento Mineral no Brasil: Desafios para o Aprimoramento da Competitividade**. *Cerâmica Industrial*, 17 (1) (2012) janeiro/fevereiro.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. [s.l.] LTC, 2020.
- CALLISTER, William D. Jr. *Fundamentos da ciência e engenharia dos materiais*. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.
- CHENG, Li et al. Molecular dynamics study of hydrogen bonding in kaolinite. *Applied Clay Science*, v. 65-66, p. 51–58, 2012.
- CORDOVIL, Gilbert Valério. **Polo cerâmico e dinâmica territorial do desenvolvimento em São Miguel do Guamá - Pará**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Filosofia e Ciências Humanas, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Belém, 2010
- DUARTE, F. A., Gomes, P. F., Ferreira, S. M. **Advanced Ceramic Materials: Recent Developments in Raw Material Selection and Processing Techniques**. *Journal of Advanced Ceramics*, 12 (2) (2023), 145-162.
- DUARTE, Rodrigo S. *Processamento de materiais cerâmicos: teoria e prática*. São Paulo: Blucher, 2023.
- FARIAS, Joana C. *Tecnologia dos materiais cerâmicos*. Recife: EdUFPE, 2020.
- FARIAS, R., LIMA, E., LIMA, A.G. (2020). **Industrial Ceramic Blocks for Buildings: Clay Characterization and Drying Experimental Study**. *Energies*, 13(11), 2834.

G. R. R. Alford et al. **Effect of calcium oxide on ceramics**. Journal of Materials Science, 2008.

JESUS, Elias Pereira de. Propriedades e aplicações dos materiais cerâmicos. São Paulo: Érica, 2016.

JESUS, Paulo Roberto Rodrigues de. **Efeitos da adição do fluoreto de lítio na densificação da alumina aditivada com 4% em peso de nióbio**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Ciência dos Materiais do Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro 2016

KINGERY, W. D.; BOWEN, H. K.; UHLMANN, D. R. **Introduction to Ceramics**. [s.l.] Wiley, 1976.

KINGERY, W. D.; BOWEN, H. K.; UHLMANN, D. R. Introduction to ceramics. 2. ed. New York: Wiley-Interscience, 1976.

M. A. B. Pereira et al. **The role of manganese oxides in ceramic glazes**. Journal of Ceramic Science and Technology, 2016.

M. R. S. R. P. de Moura et al. **Effect of zinc oxide on the properties of ceramic materials**. Journal of the European Ceramic Society, 2012.

M. R. S. R. P. de Moura et al. **Influence of iron oxide in ceramic materials**. Journal of Materials Science, 2005.

MÉDICI, E. **Panorama sobre os Materiais Cerâmicos Sustentáveis na Indústria da Construção**. Revista Brasileira de Materiais de Construção, v. 12, n. 1, p. 45-60, 2022.

MÉDICI, Ricardo. Ensaio em cerâmica vermelha: uma abordagem prática. Campinas: Unicamp, 2022.

MENDONÇA, Maria Luísa et al. Avaliação de propriedades físicas de cerâmicas incorporadas com resíduos. Cerâmica, São Paulo, v. 66, n. 379, p. 295–302, 2020.

NBR, ABNT. 10004: **Associação Brasileira de Normas Técnicas— Classificação de resíduos sólidos**, Rio de Janeiro, 2004

NIKOLIĆ, I., DUROVIĆ, D., MARKOVIĆ, S., VESELINOVIĆ, L., JANKOVIĆCASTVAN, I., RADMILOVIĆ, V. V., RADMILOVIĆ, V. R. **Alkali activated slag cement doped with Zn-rich electric arc furnace dust**. J. Mater. Res. Technol. 9, 12783–12794, 2020.

NIKOLIĆ, I. T. et al. The use of electric arc furnace dust in ceramic materials. Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 8, n. 2, p. 103–112, 2020.

OLIVEIRA, Andréia Karolline de Albuquerque. **Caracterização microestrutural do pó de aciaria elétrica para incorporação em materiais cerâmicos com aplicação na construção civil**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso.

OLIVEIRA, Fernando A. Resíduos da siderurgia: desafios e aplicações industriais. Belo Horizonte: CETEC, 2022.

PASCOE, K. J. Inorganic Non-metallic Materials. In **An Introduction to the Properties of Engineering Materials**. (1978)

PEREIRA, A. B., OLIVEIRA, M. F., & SILVA, C. S. (2019). **Characterization of Red Clay Bricks for Construction Applications**. *Materials*, 12(5), 753.

PEREIRA, Ana Cláudia. Cerâmica vermelha: propriedades e aplicações na construção civil. Florianópolis: UFSC, 2019.

PEREIRA, F. J. et al. **Influência da Muscovita em composições de cerâmicas**. *Revista Brasileira de Cerâmica*, 55 (4) (2014), 255-262.

PÉREZ, D., GUTIÉRREZ, J. **Ceramic Materials: Properties, Performance, and Applications**. *Journal of the European Ceramic Society*, 40 (12) (2020), 4051-4065.

PÉREZ, J. M.; GUTIÉRREZ, A. R. *Ciencia de materiales: cerámicos y compósitos*. Madrid: McGraw-Hill, 2020.

PHILLIPS, W. R. *Ceramics: structure, properties, and processing*. Boston: McGraw-Hill, 2009.

PUKASIEWICZ, Anderson G. M. **Tecnologia dos Processos de Fabricação IV Materiais Cerâmicos**. Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná Unidade de Ponta Grossa - Coordenação de Mecânica. 2001.

R. A. Rios. **Fundamentos de Materiais Cerâmicos**. Editora Blucher, 2014.

RAMOS, Carlos Eduardo. Estudos sobre o pó de aciaria elétrica e suas aplicações. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

RIBEIRO, A. et al. **Propriedades das argilas e suas implicações em cerâmicas**. *Jornal de Ciências dos Materiais*, 42 (7) (2011), 1225-1236.

RIOS, Lucas M. Desempenho térmico de cerâmicas com adição de óxidos metálicos. Porto Alegre: UFRGS, 2014.

RODRIGUES, A. P. Caracterização do setor cerâmico paraense. Belém: SEDAP, 2017.

ROSIN, André Queiroz. **Desenvolvimento de processo de reciclagem do resíduo siderúrgico "lama de aciaria Id"**. Trabalho de Formatura em Engenharia Metalúrgica do curso de graduação do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2022.

SANTOS, Anderson Fabrício Tocantins Souza et al. **Potencial econômico da atividade de oleiro em São Miguel do Guamá e Irituia-Nordeste do Pará**. 2009.

SILVA, Lays Capingote Serafim da; MAIA, Francinaldo Oliveira. **Processos de fabricação: uma análise da produção da cerâmica vermelha em uma empresa da cidade de Catalão-GO**. *Anais do VIII Simpósio de Engenharia de Produção de Sergipe*. 2016.

SILVA, M. C. da. **Reciclagem de pó de aciaria elétrica como matéria-prima na fabricação de materiais cerâmicos argilosos: controle das emissões atmosféricas de zinco**, 2006.

SILVA, Nicole Gröff da. **Avaliação técnica e ambiental da incorporação de pó de aciaria elétrica (PAE) em material cerâmico** (2018).

SOUSA, A. C., CRUZ, F. F. **Ceramic Matrix Composites: Fabrication, Properties, and Applications**. Materials Science and Engineering: R: Reports, vol. 158, 2021.

SOUSA, Letícia Martins de. **Materiais cerâmicos e suas aplicações tecnológicas**. Belo Horizonte: UFMG, 2021.

SOUZA, A.D.V., SOUSA, L.L., FERNANDES, L., CARDOSO, P.H.L., SALOMÃO, R. **Al₂O₃-Al(OH)₃-Based castable porous structures**. Journal of the European Ceramic Society, 35 (6) (2015), 1943-1954.

VAZ NETO, Josias de Souza. **Avaliação da incorporação do rejeito do processo Bayer em formulações com argila do município de Acará-PA visando a produção de cerâmica vermelha**. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais, da Universidade Federal do Pará. Ananindeua. 2023.

W. D. Kingery, H. K. Bowen, D. R. Uhlmann. **Introduction to Ceramics**, 3rd ed., Wiley, 1976.

WANG, X., ZHANG, T., WANG, L., XU, J. **Recent Advances in Ceramic Cutting Tools: Materials, Coatings, and Applications**. Journal of Materials Science & Technology, 117 (2023), 70-82.